

JOSÉ ROSSA JUNIOR

**ADIÇÃO DE ESCÓRIA DE ALTO FORNO EM ARGAMASSA COLANTE
TIPO AC-I.**

CURITIBA

2009

JOSÉ ROSSA JUNIOR

**UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIA DE ALTO FORNO COMO ADIÇÃO EM
ARGAMASSA COLANTE TIPO AC-I.**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de mestre, Programa de Pós-Graduação em Engenharia - PIPE, Área de Concentração: Engenharia e Ciência dos Materiais, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Dr. Kleber Franke Portella

CURITIBA

2009

DEDICATÓRIA

A Deus.

A meus pais

A minha noiva.

Todos com parcelas iguais de
incentivo, paciência e compreensão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais José e Ivone, que com sua imensa dedicação e esforço me deram a oportunidade de hoje estar realizando este trabalho.

À minha noiva Priscila pelo incentivo, força, compreensão e paciência que foram de fundamental importância.

À coordenação, professores e funcionários do Programa de Pós Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Paraná.

Aos amigos da Votorantim Cimentos, Isac José da Silva, José Eduardo Martinho Junior, José Carlos Cordeiro, Rodrigo Manoel do Nascimento, Luciana Trein Bianco, Arnaldo Barreto, Carla Cristina Batista de Oliveira, Marco Antônio Fuliotti, Wagner Jefferson dos Santos, que contribuíram para a elaboração desse trabalho.

Agradeço especialmente ao Dr. Kleber Franke Portela, que sem as suas orientações seria impossível à realização deste trabalho.

E a todos os demais que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	IX
LISTA DE TABELAS.....	XI
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS.....	XIII
LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES.....	XIV
RESUMO	XV
ABSTRACT	XVII
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 ASPECTOS GERAIS.....	1
1.2. OBJETIVOS DO TRABALHO	3
1.2.1 OBJETIVO PRINCIPAL.....	3
1.2.2 OBJETIVOS SECUNDÁRIOS	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 ARGAMASSAS INDUSTRIALIZADAS	4
2.2 NORMAS BRASILEIRAS DE ARGAMASSAS COLANTES.....	5
2.3 ESCÓRIA.....	6
2.4 ADIÇÃO DE ESCÓRIA DE ALTO FORNO EM CIMENTO E CONCRETO	7

2.5 ESTUDO DA ATIVIDADE HIDRÁULICA DA ESCÓRIA	8
2.6 ATIVADORES FÍSICOS E QUÍMICOS.....	9
2.7 PERMEABILIDADE E ÁGUA DO PORO	12
2.8 NATUREZA DO C-S-H, PRODUTOS DE HIDRATAÇÃO E MICRO ESTRUTURA.....	13
2.9 CALOR DE HIDRATAÇÃO	14
2.10 TRABALHABILIDADE E REOLOGIA.....	15
2.11 REAÇÃO ÁLCALI AGREGADO	16
2.12 ATAQUE POR SULFATOS.....	16
2.13 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	16
2.14 RETRAÇÃO DO CIMENTO DE ESCÓRIA ATIVADA.....	17
2.15 DURABILIDADE E RESISTÊNCIA À CORROSÃO	18
2.16 INFLUÊNCIA DOS TEORES DE ÓXIDO DE MANGANÊS NAS ESCÓRIAS USADAS COMO ADIÇÃO NO CIMENTO PORTLAND	19
2.17 ADIÇÃO DE ESCÓRIA ACIÁRIA EM CIMENTO PORTLAND	19
2.18 EXPANSIBILIDADE DA ESCÓRIA ACIÁRIA	20
2.19 UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIA COMO AGREGADO	20
2.20 ADIÇÃO DE MATERIAIS RECICLADOS A CIMENTOS E CONCRETOS	21

3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	22
3.1 ESCÓRIA.....	22
3.1.1 MÉTODO RÁPIDO PARA VERIFICAÇÃO DA REATIVIDADE DE ESCÓRIA DE ALTO FORNO	24
3.2 AREIA.....	25
3.3 CIMENTO PORTLAND.....	26
3.4 CAL.....	28
3.5 ADITIVO	28
3.6 COMPOSIÇÕES	28
3.7 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E DO TEMPO EM ABERTO	30
3.8 ENSAIOS FÍSICOS E MECÂNICOS	33
3.9 DIFRAÇÃO DE RAIOS X	35
3.10 FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X.....	35
3.11 MICROSCOPIA ELÊTRONICA DE VARREDURA – MEV.....	36
3.12 ANÁLISE DE METAIS E ENSAIO DE LIXIVIAÇÃO	36
3.13 ENSAIO PARA A DETERMINAÇÃO DA VISCOSIDADE.....	37
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	38

4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS ESCÓRIAS	38
4.2 CARACTERIZAÇÃO DA AREIA	43
4.3 CARACTERIZAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND.....	44
4.4 CARACTERIZAÇÃO DA CAL HIDRATADA.....	45
4.5 VISCOSIDADE DOS TRAÇOS.....	46
4.6 RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO E TEMPO EM ABERTO PARA AS COMPOSIÇÕES DE ARGAMASSA	47
4.7 RESULTADOS DE DIFRAÇÃO DE RAIOS X.....	53
4.8 RESULTADOS DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA POR VARREDURA	53
5 CONCLUSÕES.....	56
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	58
7 REFERÊNCIAS	59
8 ANEXOS.....	68

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.	MOINHO DE BOLAS UTILIZADO PARA MOAGEM DA ESCÓRIA GRANULADA.....	22
FIGURA 2.	A) ESCÓRIA DE ALTO FORNO SECA; E, B) ESCÓRIA DE ALTO FORNO MOÍDA.....	23
FIGURA 3.	PERMEABILÍMETRO DE BLAINE SEMI-AUTOMÁTICO.....	23
FIGURA 4.	MICROSCÓPIO ÓPTICO OLYMPUS, MODELO BX 51.....	24
FIGURA 5.	ÁGUA DE LAVAGEM CONTENDO SÓLIDOS EM SUSPENSÃO SENDO VERTIDA NA PENEIRA 75 μm CONFORME ENSAIO DA NBR NM 46	25
FIGURA 6.	COMPARAÇÃO DA AMOSTRA DE AREIA COM O PADRÃO DA ASTM C-40 - ENSAIO ADAPTADO À NBR NM 49.....	26
FIGURA 7.	MISTURADOR EM “Y” UTILIZADO PARA MISTURA DAS COMPOSIÇÕES	30
FIGURA 8.	EXECUÇÃO DO ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DO TEMPO EM ABERTO E DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO	31
FIGURA 9.	DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO - APARELHO PROCEQ DYNA Z6	31
FIGURA 10.	DIFRATÔMETRO DE RAIOS X, MODELO X-PERT, MARCA PHILIPS	35
FIGURA 11.	EQUIPAMENTO DE FUORESCÊNCIA DE RAIOS X (XRF), MODELO MAGIX PRO DA MARCA PHILIPS	36
FIGURA 12.	VISCOSIMETRO BROOKFIELD MODELO DVII+	37
FIGURA 13.	ASPECTOS DA FRAÇÃO 100 μm DA ESCÓRIA, SOB MICROSCÓPIO DE LUZ TRANSMITIDA	43
FIGURA 14.	DETALHE DA CRITALIZAÇÃO DA GIPSITA, AMOSTRA TRATADA COM SOLUÇÃO AQUOSA	

DILUÍDA DE SULFATO DE ALUMÍNIO – AUMENTO 40 VEZES	41
FIGURA 15. GRÁFICO REPRESENTATIVO DAS VISCOSIDADES OBTIDAS VARIANDO-SE AS ADIÇÕES DE ESCÓRIA.....	47
FIGURA 16. GRÁFICO COM OS RESULTADOS DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO DAS COMPOSIÇÕES DE CPII- Z E A ESCÓRIA C	48
FIGURA 17. GRÁFICO COM OS RESULTADOS DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO DAS COMPOSIÇÕES DE CPII- F E A ESCÓRIA C	49
FIGURA 18. GRÁFICO COM OS RESULTADOS DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO DAS COMPOSIÇÕES DE CPII- Z E A ESCÓRIA B	50
FIGURA 19. GRÁFICO COM OS RESULTADOS DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO DAS COMPOSIÇÕES DE CPII- Z E A ESCÓRIA A	51
FIGURA 20. GRÁFICO COM OS RESULTADOS DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO DAS COMPOSIÇÕES DE CAL CH-III E A ESCÓRIA C	52
FIGURA 21. DIFRATOGRAMA TÍPICO DOS TRAÇOS ESTUDADOS.....	53
FIGURA 22. MICROGRAFIA DA SUPERFÍCIE DE FRATURA DE UMA DAS AMOSTRAS DE ARGAMASSA ENDURECIDA, AUMENTADA EM 20 VEZES E SEUS RESPECTIVOS ESPECTRO POR MICROSSONDA ANALÍTICA E COMPOSIÇÃO QUÍMICA ELEMENTAR NA REGIÃO DE ANÁLISE.....	54
FIGURA 23. MICROGRAFIA DA SUPERFÍCIE DE FRATURA DE UMA DAS AMOSTRAS DE ARGAMASSA ENDURECIDA - AUMENTADA EM 54 VEZES.....	54
FIGURA 24. MICROGRAFIA DA SUPERFÍCIE DE FRATURA DE UMA DAS AMOSTRAS DE ARGAMASSA ENDURECIDA - AUMENTADA EM 500 VEZES.....	55

LISTA DE TABELAS

TABELA 1.	CLASSIFICAÇÃO DAS ARGAMASSAS COLANTES INDUSTRIALIZADAS.....	5
TABELA 2.	COMPOSIÇÃO DOS CIMENTOS COMUNS E DOS MATERIAIS UTILIZADOS, SEGUNDO A NBR 5732 [46] E 11578 [47].....	26
TABELA 3.	EXIGÊNCIAS FÍSICAS DOS CIMENTOS.....	26
TABELA 4.	EXIGÊNCIAS QUÍMICAS DOS CIMENTOS.....	26
TABELA 5.	DEFINIÇÃO DOS TRAÇOS DE ARGAMASSA	29
TABELA 6.	CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DA ESCÓRIA POR FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X.....	38
TABELA 7.	RESULTADOS DA ANÁLISE QUANTITATIVA DO GRAU DE VITRIFICAÇÃO DAS ESCÓRIAS.....	39
TABELA 8.	RESULTADOS DE DETERMINAÇÃO DA FINURA DAS ESCÓRIAS PELO MÉTODO DE BALINE	39
TABELA 9.	RESULTADOS DA ANÁLISE QUANTITATIVA DO GRAU DE CRISTALIZAÇÃO DAS ESCÓRIAS	40
TABELA 10.	ANÁLISE DE METAIS – RESULTADOS DA MASSA BRUTA – ESCÓRIA C.....	42
TABELA 11.	RESULTADOS DO TEOR DE METAIS LIXIVIADOS – ESCÓRIA C.....	42
TABELA 12.	RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO DA AREIA UTILIZADA.....	43
TABELA 13.	RESULTADOS DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X PARA AS AMOSTRAS DE CIMENTO.....	44
TABELA 14.	RESULTADOS DE MASSA ESPECÍFICA, FINURA POR BLAINE, ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA E EXPANSIBILIDADE	45
TABELA 15.	RESULTADOS DE TEMPO DE PEGA E ÍNDICE DE FINURA POR PENEIRADOR AERODINÂMICO	45

TABELA 16. RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	45
TABELA 17. RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DA CAL POR FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X	46
TABELA 18. RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À ADERÊNCIA À TRAÇÃO E TEMPO EM ABERTO PARA AS COMPOSIÇÕES DE CPII-Z E A ESCÓRIA C – BAIXA REATIVIDADE	47
TABELA 19. RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À ADERÊNCIA À TRAÇÃO E TEMPO EM ABERTO PARA AS COMPOSIÇÕES DE CPII-F E A ESCÓRIA C – BAIXA REATIVIDADE	49
TABELA 20. RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À ADERÊNCIA À TRAÇÃO E TEMPO EM ABERTO PARA AS COMPOSIÇÕES DE CPII-Z E A ESCÓRIA B – MÉDIA REATIVIDADE	50
TABELA 21. RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À ADERÊNCIA À TRAÇÃO E TEMPO EM ABERTO PARA AS COMPOSIÇÕES DE CPII-Z E A ESCÓRIA A – MAIOR REATIVIDADE	51
TABELA 22. RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À ADERÊNCIA À TRAÇÃO E TEMPO EM ABERTO PARA AS COMPOSIÇÕES DE CAL CH-III E A ESCÓRIA C – MENOR REATIVIDADE	51

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AC-I	Argamassa colante de uso interno, definida pela NBR 14081/04
CP II-Z	Cimento Portland com adição de materiais pozzolânicos
CP II-F	Cimento Portland com adição de materiais calcínicos.
CP III-32-RS	Cimento Portland de alto forno – resistente a sulfatos
CP II E-32	Cimento Portland com adição de escória de alto forno.
CPV-ARI	Cimento Portland de alta resistência inicial.
NBR	Norma Brasileira
ASTM	Órgão americano de normalização
IBS	Instituto Brasileiro de Siderurgia
OPC	Cimento Portland ordinário
FRX	Fluorescência por raios X
DRX	Difração por raios X
CHI	Cal hidratada tipo I
CHII	Cal hidratada tipo II
CHIII	Cal hidratada tipo III
MHEC	Metil hidroxi etil celulose
MEV	Microscópio eletrônico de varredura
UFPR	Universidade Federal do Paraná
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
AEA	Agente incorporador de ar
WRRe	Agente redutor de água
SHR	Agente redutor de retração
AAS	Escória alcalina ativada
BFS	Escória de alto forno
TG	Análises termogravimétricas

LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES

C3A	Aluminato tricálcico
C2S	Silicato dicálcico
Ca(OH) ₂	Hidróxido de cálcio
C-S-H	Produto da hidratação do clínquer
C4AH13	Produto da hidratação do clínquer
Na ₂ CO ₃	Carbonato de sódio
Na química do cimento	
N	Sódio
A	Alumínio
G	Gipsita
E	Bauxita calcinada
γ-C2S	Silicato dicálcico apresentando modificação
polimorfa na forma γ	
C3A.3CaSO ₄ .32H ₂ O	Etringita
Op	Produto externo
Ip	Produto interno
PC	Poros capilares
MPa	Mega Pascal – unidade de tensão
μm	Micrometro
NM	Norma Mercosul
CaSO ₄ . 2H ₂ O	Gipsita

RESUMO

O gerenciamento inadequado de resíduos da indústria metalúrgica, as denominadas escórias de alto forno, pode contribuir para o agravamento de problemas ambientais. Neste rejeito é comum se encontrar teores de metais pesados e outros contaminantes em proporções superiores às recomendadas em normas. Visando minimizar este problema se faz necessário viabilizar o seu emprego em novos materiais. Uma das opções é utilizá-los como aglomerante alternativo em cimento Portland. Além de representar vantagens ao meio ambiente por ser um resíduo, a escória melhora o desempenho final do produto devido às suas propriedades, das quais se destacam a elevada resistência mecânica, a boa durabilidade em meios agressivos, o seu baixo calor de hidratação e, principalmente, a sua característica de maior inércia química, enclausurando os materiais ambientalmente poluentes. Neste estudo foi investigada uma nova tecnologia comercial e a viabilidade da utilização da escória de alto forno em argamassas colantes, tipo AC-I (argamassa destinada para assentamento de revestimentos cerâmicos em áreas internas). Este produto foi escolhido devido ao seu expressivo volume no mercado nacional que é de, aproximadamente, 2,3 milhões de toneladas/ano, com perspectiva de crescimento de 10% para este ano e, pela possibilidade de redução do impacto ambiental pela diminuição da exploração das jazidas de calcário, redução da emissão do dióxido de carbono gerado na fabricação do clínquer, e ainda, pela economia de energia na sua produção. Tendo em vista que a escória de alto forno possui propriedades hidráulicas latentes se procurou avaliar as adições de escórias com diferentes reatividades, com relação à resistência à tração das argamassas colantes de uso interno (AC-I). As escórias foram ativadas fisicamente pelo aumento de sua superfície específica. Após a caracterização de todos os insumos trabalhados, foram definidas 2 bateladas de traços, tanto com cimento do tipo CII-F, quanto CII-Z, a fim de se verificar a influência de ambas na obtenção da argamassa. Comparativamente, foram executados 2 traços padrões de argamassas colantes, tipo AC I, utilizados no mercado brasileiro. No estado fresco foram avaliadas as viscosidades das composições como uma forma de medir a trabalhabilidade das argamassas. No estado endurecido foram

avaliadas as propriedades de resistência de aderência à tração e a determinação do tempo em aberto. A quantificação dos produtos de hidratação das pastas e a análise química elementar foi obtida pela difratometria por raios X (DRX), fluorescência de raios X (FRX) e microsonda analítica de raios X (EDS). A distribuição dos poros da argamassa foi verificada por intermédio da microscopia eletrônica de varredura (MEV), na superfície de fratura da amostra. Como resultado obteve-se que a adição de escória de alto forno em substituição ao cimento Portland em argamassas colantes do tipo AC I, não alterou a viscosidade e a trabalhabilidade do produto final. Pelo contrário, foi verificado durante as suas aplicações melhorias em termos de trabalhabilidade na medida em que se aumentou a proporção das adições de 5 a 20%. Isto se deveu, principalmente, pela característica vítrea dos grãos de escória de alto forno. A resistência de aderência das argamassas independeu da reatividade das escórias, uma vez que foram obtidos resultados acima dos valores de norma com adições de até 15% (em massa) de ambos os tipos de escória, de baixa, média e de alta reatividade. O cimento Portland CP II – F apresentou um desempenho superior ao CP II – Z em termos de resistência de aderência à tração, que variou entre 0,1 e 0,5 MPa, que pode ser atribuído a sua maior área específica e pela maior quantidade de clínquer que o CP II – F possui, essa porcentagem varia entre 90 e 94%. O teor ótimo de adição para os traços com cimentos CP II - F, e CP II – Z foi de 5% apresentado nos traços F1e Z1, respectivamente. No entanto, as amostras com até 20% (em massa) de substituição de cimento por escória atenderam os valores de resistência de aderência à tração e tempo em aberto, estabelecidos pela normalização brasileira. Todos os traços feitos somente com escória e cal apresentaram resultados de resistência de aderência à tração e ou tempo abaixo dos requisitos mínimos de norma, indicando assim, a inviabilidade da produção de argamassas colantes sem adição de cimento Portland. Finalmente, e de acordo com as análises de FRX e MEV com EDS, não foram obtidas diferenças significativas na composição e nos produtos de hidratação do cimento dos traços de argamassa, bem como na formação de poros, mesmo quando dosados em diferentes teores de escória.

ABSTRACT

The inappropriate management of waste from a siderurgic industry called blast furnace slag can cause environmental impact. High proportions of heavy metals and other contaminants can be found on this kind of reject. In order to reduce the impact of this problem it's necessary to create new uses of it in new materials. One of the options is using them as an alternative Portland cement binder. Besides its environmental advantages the blast furnace slag increases binder's performance due to it's properties. The following properties can be highlighted: high mechanical resistance, good durability in aggressive environments, low heat of hydration and, mainly, high chemical inertia that can enclosure pollutant materials. On this paper a new technology was investigated: the viability of the use of blast furnace slag in dry-set mortars type AC-I (used for setting ceramic tiles on interior applications). This product was chosen due to its high potential in the Brazilian market (~2,3 ton per year) with the potential of growth of 10% for the year of 2009, possibility of reduction of the environmental impact from the exploitation of calcareous rock deposits, reduction on emissions of carbon dioxide during the manufacturing of clinker and energy savings on its production. As soon as blast furnace slag has clear hydraulic properties, traction strength of slag additions with different reactivity's has been evaluated. Slag has been activated by increasing its specific surface. After the characterization of the materials used on the study, 2 sets of proportions had been defined, using cement type CII-F and CII-Z, in order to verify the influence of both on mortar. The viscosity of the compositions has been evaluated in fresh state as a form of evaluation of the workability of the mortars. In the hardened state, the adhesive traction strength and quick open time have been analyzed. The quantification of the hydration products from pastes and elemental chemical analyses have been obtained by X-ray diffractometry (XRD), X-ray fluorescence (XRF) and analytical X-ray micro plunger (EDS). The mortar pore was verified by scanning electron microscopy, on the fractured surface of the sample. As a result, it was noticed that the blast furnace slag addition instead of the tile adhesive type AC I, hasn't changed the viscosity and workability. On the contrary, it was verified, during its application,

improvements in terms of workability along with the increase of addition, from 5 to 20%.

This is due mainly to the glassy characteristic of the blast furnace slag grain. The adhesive traction strength of the tile adhesive is not related to the slag reactivity, once the results obtained were above the standard limits with additions up to 15% (in mass) of all three kinds of slag, low, medium and high reactivity. The Portland cement kind CPII-F has presented a better performance compared to the CPII-Z type in matters of adhesive traction strength, varying from 0,1 to 0,5 MPa, what may be attributed to its higher value of specific surface and higher amount of clinker, the CPII-F type has from 90 to 94% of clinker. The optimum addition level for the sets with the cements types CPII-F, e CPII-Z was 5% presented on the compositions F1 and Z1, respectively. However, samples with substitution of 20% (in mass) of cement for slag have attended the limits of adhesive traction strength and open time determination, established by Brazilian standard. All the mixtures prepared with only slag and lime have presented results of adhesive traction strength and open time determination below 0,5 MPa, lower than the limits established by Brazilian standard, this way indicating the inviability of production of tile adhesives without Portland cement addition. Finally, according to the FRX e MEV with EDS analysis, there weren't obtained significant differences in the composition of the hydrated compounds of cement in the mortar, neither on the pore formation, even with different dosages of slag.

1. INTRODUÇÃO

1.1 ASPECTOS GERAIS

O Brasil é hoje o décimo maior produtor mundial de aço e, em 2007, foi registrado como sendo o sexto ano consecutivo de forte crescimento da produção e demanda no mercado mundial. A demanda de aço bruto superou a marca de 34 milhões de toneladas, com uma expansão de 6,8%. Existe uma previsão de investimentos no setor de US\$ 58,7 bilhões até o ano de 2015, com projeção de alcançar a capacidade instalada de 66,7 milhões de toneladas ao final desse período. (dados do Instituto Brasileiro de Siderurgia [*])

Com o aumento da produção de aço aumenta, também, a produção de resíduos ou escória de alto forno. Segundo o Instituto Brasileiro de Siderurgia em 2006, a indústria do aço produziu, aproximadamente, 13,5 milhões de toneladas de resíduos, uma média de 435 kg/t de aço produzida. As escórias de alto forno e de aciaria representaram 80% desse total, com 10,8 milhões de toneladas. O restante foi formado por material particulado dos sistemas de despoeiramento (11%) e lamas coletadas nas estações de tratamento de efluentes (9%).

O gerenciamento inadequado destes resíduos pode contribuir para o agravamento dos problemas ambientais. Visando minimizar este problema se faz necessário viabilizar o seu emprego em novos materiais. Uma das opções é utilizá-los como aglomerante alternativo ao cimento Portland [1, 2]. Além de representar vantagens ao meio ambiente por ser um resíduo, a escória melhora o desempenho final do produto devido às suas propriedades, das quais se destacam a elevada resistência mecânica, a boa durabilidade em meios agressivos e o seu baixo calor de hidratação.

Neste estudo foi investigada a viabilidade da utilização da escória de alto forno em materiais para a construção civil, em específico, em argamassas colantes, tipo AC-I (argamassa destinada para assentamento de revestimentos cerâmicos em áreas internas). Este produto foi escolhido devido ao seu elevado

* <http://www.ibs.org.br>, acesso em 22/09/2008

mercado nacional que é de, aproximadamente, 2,3 milhões de toneladas/ano, com perspectiva de crescimento de 10% para este ano e pela possibilidade de redução do impacto ambiental pela diminuição da exploração das jazidas de calcário, redução da emissão do dióxido de carbono gerado na fabricação do clínquer e, ainda, pela economia de energia na sua produção. E, ainda, por se tratar de um insumo que já faz parte de indústria cimenteira e não da indústria de argamassas industrializadas.

1.2. OBJETIVOS DO TRABALHO

1.2.1 OBJETIVO PRINCIPAL

O objetivo deste trabalho é estudar a viabilidade e o impacto da adição de escórias de alto forno em argamassa colante, tipo AC-I, em substituição ao cimento Portland, bem como determinar os teores adequados de sua incorporação.

1.2.2 OBJETIVOS SECUNDÁRIOS

- Verificar as diferenças nas propriedades das argamassas colantes, tipo AC-I, com diferentes teores de escórias de alto forno estudados (5 a 25%).
- Avaliar o desempenho destas escórias de alto forno com diferentes reatividades e analisar as suas influências no tipo de cimento utilizado.
- Contribuir para a minimização dos impactos do crescimento urbano ao meio ambiente, pela produção de uma argamassa colante AC-I de maneira mais sustentável.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na literatura correlacionada não foram encontradas informações específicas referentes ao uso de escórias de alto forno em argamassas colantes, principalmente, nas do tipo AC I, por ser um material de tecnologia inovadora. Em função deste fato, foram investigadas as mudanças nas propriedades e microestruturas de argamassas e concretos com este mesmo tipo de adição, uma vez que há a participação direta da maioria destes componentes na mistura. Ou seja, tais alterações físicas e químicas devem também acontecer no material idealizado.

2.1 ARGAMASSAS INDUSTRIALIZADAS

Argamassa industrializada é uma mistura homogênea composta por areias naturais ou artificiais, cal hidratada, cimento Portland e aditivos químicos.

As argamassas podem ser divididas nos seguintes grupos: i) argamassas básicas que são utilizadas para assentamento de blocos, revestimentos de paredes e contra pisos; ii) argamassas colantes, que são utilizadas no assentamento de revestimento cerâmico em pisos e paredes; e, iii) as argamassas de rejuntamento.

Antes da existência das argamassas colantes no Brasil, os revestimentos cerâmicos eram assentados com método convencional, utilizando uma mistura de areia e cimento ou ainda com adição da cal. Essas argamassas eram feitas na própria obra. Neste caso, anterior ao assentamento era necessário imergir as peças de revestimentos cerâmicos em um recipiente com água, uma vez que tais argamassas não tinham a capacidade de reter em seu interior a quantidade de água necessária para uma boa hidratação do cimento.

O referido método era considerado artesanal, complexo, de baixa produtividade e qualidade.

Devido aos inúmeros deslocamentos de revestimentos cerâmicos de fachadas e pisos, muitas vezes causados pela mão de obra despreparada ou pela falta de controle na produção da argamassa feita em obra, surgiu no início

da década de 70 a primeira argamassa colante do Brasil. Esta, veio acompanhada por um processo inovador, que constituía no assentamento do revestimento cerâmico sem haver a necessidade de imergir as peças de revestimentos cerâmicos em água.

Desde então, continuam os processos de pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias a fim de se ter uma argamassa específica para cada tipo de aplicação.

2.2 NORMAS BRASILEIRAS DE ARGAMASSAS COLANTES

Atualmente, existem 6 normas brasileiras específicas para argamassas colantes, sendo que 5 destas encontram-se listadas na TABELA 1 e na seqüência do texto.

A NBR 14081 [3] classifica as argamassas colantes em quatro grupos; argamassa colante industrializada – tipo I; argamassa colante industrializada – tipo II; argamassa colante industrializada – tipo III e a argamassa colante industrializada – tipo E, de acordo com a TABELA 1.

TABELA 1. CLASSIFICAÇÃO DAS ARGAMASSAS COLANTES INDUSTRIALIZADAS.

Propriedade	Métodos de ensaio	Argamassas colantes industrializadas			
		Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo E
Tempo em aberto, em minutos.	NBR 14083 [4]	≥ 15	≥ 20	≥ 20	Argamassas tipo I, II e III com tempo em aberto em, no mínimo, 10 min. do especificado nesta tabela.
Resistência de aderência à tração (MPa)					
Sob cura normal	NBR 14084 [5]	≥ 0,5	≥ 0,5	≥ 1,0	
Sob cura submersa		≥ 0,5	≥ 0,5	≥ 1,0	
Sob cura em estufa		---	≥ 0,5	≥ 1,0	
Deslizamento (mm)	NBR 14085 [6]	≤ 0,7	≤ 0,7	≤ 0,7	

A argamassa colante, tipo I, é uma argamassa com menor teor de cimento e aditivos químicos, é indicada para aplicações de revestimentos cerâmicos em ambientes internos. A do tipo II, é indicada para aplicações de revestimentos cerâmicos em ambientes internos e externos, possuindo características de adesividade que permitem absorver os esforços termo-higroscópicos e do vento,

típicos de áreas externas. A argamassa tipo III é indicada para aplicações de revestimentos cerâmicos em ambientes internos e externos, sendo que esta argamassa é composta por uma maior quantidade de cimento e aditivos químicos, proporcionando assim, uma aderência superior entre as interfaces em relação às argamassas tipo I e tipo II.

A argamassa colante tipo E deve atender aos respectivos requisitos do tipo I, II ou III, com tempo em aberto estendido.

Na NBR 14082 [7], podem ser encontradas as informações necessárias para a execução do substrato padrão, o procedimento de mistura da argamassa colante e os valores de temperatura, umidade e velocidade do vento para execução dos ensaios com argamassas colantes.

Na NBR 14083 [4], encontra-se descrito o método da determinação do tempo em aberto das argamassas colantes.

Na NBR 14084 [5], tem-se o método de ensaio para a determinação da resistência de aderência à tração, para cura normal, cura submersa e cura em estufa, os quais serão explicados detalhadamente no capítulo materiais e métodos.

Na NBR 14085 [6], está apresentado o método de ensaio de determinação do deslizamento. Este ensaio consiste em medir o deslizamento vertical de peças de porcelanato assentadas com argamassa colante após um tempo de 20 minutos da aplicação.

2.3 ESCÓRIA

A escória é um subproduto do processo metalúrgico, obtida durante a fundição dos metais, quando as impurezas são separadas e removidas em diversas faixas granulométricas. A sua constituição química é formada por uma mistura de óxidos metálicos, sulfatos metálicos e metais na forma elementar [1].

A escória resultante da produção do aço é constituída principalmente por cálcio, magnésio e alumínio, e quando adicionadas aos cimentos utilizados para execução de concreto, podem promover mudanças nas suas propriedades, tais como minimização da reação álcali-agregado, da permeabilidade, do calor de

hidratação, da retração por secagem e o aumento da resistência a sulfatos e da resistência à compressão para idades mais avançadas.

2.4 ADIÇÃO DE ESCÓRIA DE ALTO FORNO EM CIMENTO E CONCRETO

A escória de alto forno é quimicamente parecida com o clínquer Portland, pois contém uma quantidade considerável de silicato dicálcico e por vezes silicato tricálcico [8].

A substituição parcial do calcário pela escória tem como vantagens uma economia de energia devido à redução do calor de formação do clínquer e a diminuição da formação de gases, especialmente o CO₂, nocivo à atmosfera [9].

RESCHKE [10] estudou a utilização da escória granulada de fundição, resíduo gerado no processo de fusão de ferro fundido via cubilô, como um material cimentante em concretos na construção civil. Os ensaios de caracterização da escória apresentaram bons resultados para aplicação deste resíduo como substituição ao cimento, em termos de índice de pozolanicidade, grau de vitrificação, entre outros. Foram estudados concretos contendo diferentes teores de substituição de cimento por escória granulada de fundição (0% - 10% - 30% - 50%), em volume, e relações água/aglomerante (0,40 - 0,55 - 0,70). Os resultados mostraram que, para a mesma relação água/aglomerante, a substituição de cimento por escória granulada de fundição aumentou significativamente a taxa de absorção de água e não prejudicou significativamente no processo de penetração de íons cloreto. Entretanto, para um mesmo valor de resistência à compressão, a incorporação de escória granulada de fundição foi viável técnica e economicamente, pois diminuiu a taxa de absorção e a penetração de cloretos.

CHAMON [11], estudou a Influência de adições no módulo de elasticidade dinâmico, na resistência à fadiga e na tenacidade à fratura para concretos convencionais. As propriedades mecânicas foram analisadas em concreto com diferentes adições de sílica ativa gel, escória de alto forno granulada e resíduo de cerâmica vermelha. De forma geral, tais adições contribuíram de maneira diferenciada para as propriedades analisadas, demonstrando não afetar de forma significativa o módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias. As adições de 20%

de sílica ativa gel, escória de alto forno granulada e resíduo de cerâmica vermelha tenderam a diminuir sensivelmente a resistência à tração na flexão.

PEREIRA [12] estudou a influência das adições minerais na durabilidade do concreto de cobrimento sujeito à carbonatação. Concretos compostos com adições minerais, tais como sílica ativa, metacaulinita, cinza de casca de arroz, escória de alto forno e cinza volante, foram submetidos a uma avaliação experimental, desenvolvida no Centro Tecnológico de Engenharia Civil de Furnas Centrais Elétricas S.A., em Goiânia, visando conhecer a capacidade de proteção do cobrimento frente à corrosão da armadura induzida por carbonatação do concreto. Os resultados mostraram que existem diferenças significativas de comportamento entre os concretos com adições e que nem sempre as adições minerais causam prejuízo de desempenho. No que se referiu à carbonatação; ao contrário, foi verificado que as adições minerais metacaulinita e sílica ativa proporcionaram ganhos de desempenho aos concretos.

MASSUCATO [13], estudou as influências das propriedades oriundas da adição de escória de alto forno à carvão vegetal e à coque, do concreto no estado fresco e endurecido, produzido com cimentos que já utilizam em sua composição a escória de alto forno. Foram avaliados os efeitos na resistência mecânica, módulo de elasticidade, abatimento, incorporação de ar, tempo de pega e exsudação. O estudo comprovou que a utilização da escória de alto forno a carvão vegetal como adição, não provocou alterações nas propriedades do concreto no estado fresco, em comparação com a escória de alto forno a coque. A resistência à compressão com adição da escória de alto forno a carvão vegetal aumentou em até 5% em idades superiores há 60 dias em comparação com o concreto sem adição de escória.

2.5 ESTUDO DA ATIVIDADE HIDRÁULICA DA ESCÓRIA

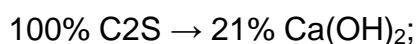
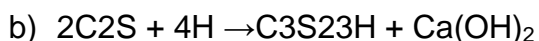
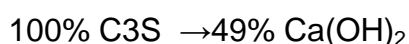
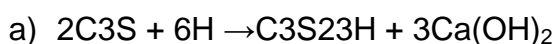
PAL, MUKHERJEE e PATHAK [14], concluíram em seu estudo que o índice hidráulico (HI) da escória tem uma forte relação com as suas propriedades físicas e químicas, bem como os teores de SiO_2 , CaO , MgO e Al_2O_3 , índice de vitrificação e a finura pelo método de Blaine.

2.6 ATIVADORES FÍSICOS E QUÍMICOS

As escórias de alto forno possuem propriedades hidráulicas, entretanto, tais reações são muito lentas, daí a necessidade dos ativadores e catalisadores para acelerá-las.

Segundo ESPER e HELENE [15], os ativadores físicos atuam diretamente na temperatura e na finura das escórias. Já, os ativadores químicos (cal e sulfatos) favorecem a reatividade e participam da reação formando novos compostos. O hidróxido de sódio atua como um catalisador pois não participa da reação.

No cimento Portland o sulfato de cálcio e a cal atuam como ativadores químicos, o sulfato combina-se com o aluminato tricálcico (C3A) do clínquer originando a etringita que se transformará mais tarde em monosulfoaluminato cálcico [1]. A cal liberada pela hidratação do silicato tricálcico (alita - C3S) e do silicato dicálcio (belita - C2S) constitui o principal ativador das escórias. Na sequência, encontram-se listadas as reações de hidratação dos cimentos com escória:



Observa-se que quanto maior a quantidade de C3S, maior é o teor de $Ca(OH)_2$ liberado, essa característica é muito importante quando se utilizam cimentos com altos teores de escória. O composto químico, denominado silicato de cálcio hidratado (C-S-H) sob a forma de gel constitui o principal produto de hidratação do cimento Portland com adição de escórias de alto forno, sendo responsável pela sua resistência mecânica. Encontra-se, ainda, como produto da hidratação o aluminato tetracálcico hidratado (C4AH13), a portlandita ($Ca(OH)_2$) e o monosulfoaluminato cálcico, que pode combinar-se com o C4AH13 formando soluções sólidas [1, 2].

COLLINS e SANJAYAN [16] estudaram as propriedades de um concreto contendo escória ativada (AAS). Dois tipos de ativadores foram usados: o hidróxido de sódio em combinação com o carbonato de sódio e o silicato de sódio

em combinação com a cal hidratada. Com um fator água/cimento de 0,5 a escória ativada com silicato de sódio apresentou uma perda mínima por abatimento acima de 2 h. Já, a escória ativada com a solução líquida de silicato de sódio apresentou uma considerável perda de trabalhabilidade inicial com perda de água por abatimento superior a 2 h. O concreto dosado com escória ativada pela pasta de cal e silicato de sódio mostrou uma resistência à compressão similar ao do concreto de cimento Portland padrão na idade de 1 dia, apresentando uma resistência à compressão superior para idades mais avançadas. O concreto com escória ativada com carbonato de sódio e hidróxido de sódio teve um ganho moderado da resistência para idades de três dias. A retração por secagem dos concretos com ativadores de escória foi maior do que o concreto com cimento Portland padrão.

BAKHAREV, SANJANYAN, CHENG [17] investigaram a ativação da escória australiana (AAS) pelos componentes à base de silicato de sódio, hidróxido de sódio, carbonato de sódio, fosfato de sódio e as combinações destes ativadores. O ativador mais eficaz foi o silicato de sódio líquido. Com base nesta investigação, concluiu-se pelo uso de uma solução do silicato de sódio com um baixo índice do Na para a formulação do concreto do AAS.

BAKHAREV, SANJANYAN, CHENG [18] apresentaram em seu estudo os resultados de uma investigação de um concreto que incorporou a escória básica ativada (AAS) como a única pasta. Os ativadores utilizados foram os silicatos de sódio líquidos (Na de 4 a 7%, em massa, de escória) e um ativador multi composto ($\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{CO}_3$, sendo o Na na proporção de 8%, em massa da escória). O AAS utiliza subprodutos industriais e desenvolve elevadas resistências iniciais. Entretanto, algumas de suas propriedades tais como a elevada retração e trabalhabilidade ruim impedem sua aplicação prática. Os aditivos superplastificantes, agentes incorporadores de ar (AEA), redutores de água (WRR), e aditivos para reduzir a retração (SHR) foram utilizados em dosagens de (6 ± 10) ml/kg em conjunto com a gipsita (g), na proporção em peso de 6% da escória) foram testadas para melhorar as propriedades do concreto do AAS. O concreto ativado pelo silicato de sódio líquido teve as melhores propriedades mecânicas. Os aditivos utilizados AEA, SHR e a gipsita reduziram significativamente sua retração e melhoraram a trabalhabilidade, sem ter nenhum

efeito negativo na resistência à compressão. Com base nesta investigação, o aditivo incorporador de ar foi recomendado para o uso no concreto do AAS.

XINGHUA, WENPING, CHUNXIA, DONGXUE e XUEQUAN [19] estudaram o aumento da resistência do cimento Portland com adição de escória de alto forno (BFS) e cinzas volantes “fly ash” com ativadores, tais como o sal de sódio (N), aluminato (A), gipsita calcinada (G) e bauxita calcinada (E). Este cimento composto obteve um grande aumento de resistência. O sal de sódio aumentou a alcalinidade da solução e promoveu a despolimerização de escória de alto forno e do “fly ash”. A bauxita calcinada se dissolveu e participou na hidratação. Os principais produtos de hidratação foram o CSH e os cristais de Ca(OH)_2 , que embora em pouca quantidade, promoveram um aumento da resistência do cimento. A portlandita reagiu com (AlO_4^{5-}) e (SiO_4^{4-}) despolimerizando a escória de alto forno e o “fly ash” para formar mais produtos e reforçar conseqüentemente a estrutura da pasta do cimento endurecido.

CAIJUN, SHUNFU [20], estudaram as propriedades cimentícias da escória granulada ($\gamma\text{-C2S}$) curadas em autoclave. Esse composto não apresentou propriedades cimentícias em água, mas apresentou tal propriedade na presença dos ativadores alcalinos em temperaturas ambientes. Nesse estudo foi avaliada a reatividade hidráulica da escória granulada curada em autoclave. Os resultados indicaram que a combinação de escória granulada e um material silicoso podem produzir um grande aumento de resistência. E, ainda, que a introdução de uma pequena quantidade de cimento de Portland ou de cal hidratada na escória granulada pode aumentar significativamente a resistência, sendo a cal mais eficaz do que o cimento Portland devido à presença de Al neste último. Para se obter uma resistência satisfatória a cura em autoclave deve acontecer a uma temperatura superior a 175 °C por um período de, aproximadamente, 4 h.

OLIVEIRA [21] estudou o efeito dos ativadores e da temperatura na composição química na água do poro de pastas endurecidas de cimento com adição de escória. O estudo demonstrou que as principais espécies químicas encontradas na água do poro foram a hidroxila, o sódio, o potássio e o cálcio, em

maior quantidade e, o silício, o alumínio, íons sulfato, sulfetos, tiosulfatos e tiosulfitos em menor concentração. Também, foi demonstrado que a temperatura da cura não influenciou significativamente o pH e a composição das soluções.

Segundo SILVA [22], a cura térmica trouxe benefícios em argamassas de cimentos de escória de alto forno ativada por silicato de sódio, hidróxido de sódio, cal hidratada e cal hidratada mais gipsita. A maior influência da temperatura na hidratação de cimentos de escória de alto forno comprovou que a sua energia de ativação foi maior que a do cimento Portland e que, conseqüentemente, o benefício resultante do emprego de cura térmica foi também superior. Esta característica foi comprovada pela aceleração da resistência à compressão das argamassas de cimento de escória de alto forno. A temperatura de cura não interferiu nos produtos de hidratação desses cimentos, mas influenciou na sua distribuição e na porosidade das pastas.

FREITAS, ERLUND e MARTINS [23] estudaram as condições de temperatura e umidade durante o período de cura, avaliando as características mecânicas, absorção capilar, permeabilidade ao ar, além da evolução da hidratação por meio da análise de imagens de concretos, submetidos a dois tipos de cura: cura térmica a 60 °C e cura úmida por sete dias. Concluiu-se que tais propriedades tiveram grande influência no desenvolvimento da microestrutura, da durabilidade e de outras propriedades do concreto. Nesta pesquisa, foram utilizados o cimento Portland de alto forno (53% de escória), o cimento de alta resistência inicial sem adições e o cimento de alta resistência inicial resistente a sulfatos (27% de escória). De acordo com os resultados obtidos, os concretos com adição de escória apresentaram os melhores desempenhos contra o ataque de cloretos, independente da cura empregada, enquanto o cimento sem adição apresentou o melhor desempenho contra a carbonatação, onde a cura mostrou ser um diferencial.

2.7 PERMEABILIDADE E ÁGUA DO PORO

A permeabilidade do concreto é um fator essencial para a sua durabilidade, sendo dependente das permeabilidades individuais da pasta e dos

agregados [1, 2, 24]. Os poros na pasta são divididos em macroporos que têm dimensões milimétricas e podem ser gerados por intermédio de aditivos incorporadores de ar e falhas no adensamento, poros capilares e poros de gel. Os poros capilares estão relacionados com o fator água/cimento, pois a água requerida para o processo de hidratação do cimento é menor que a água adicionada. Esse excesso de água migra para a superfície da pasta formando os poros capilares. Os poros capilares apresentaram menor dimensão que os poros de gel. Estes últimos relacionaram-se diretamente com os produtos de hidratação do cimento como o C-S-H, e tenderam a aumentar com o tempo, ao contrário dos poros capilares. A permeabilidade das pastas de cimento com adição de escória foi sensivelmente menor quando comparado a um cimento comum, conferindo assim uma maior durabilidade a esse tipo de cimento.

2.8 NATUREZA DO C-S-H, PRODUTOS DE HIDRATAÇÃO E MICRO ESTRUTURA

RICHARDSON e CABRERA [24] compararam a natureza do C-S-H em misturas reais de cimento com escória, com os sistemas modelos que envolviam C3S. Os produtos da hidratação e as características microestrutural atual no modelo e nos sistemas reais foram amplamente similares. Em ambos, a morfologia do produto exterior C-S-H (Op) mudou do “fibrilar” para “folha” enquanto o índice da escória foi aumentado. As relações do Ca (Si + Al) do produto interno (IP) e de C-S-H (Op) foram similares em cimentos com escória, mas diferentes nos sistemas modelo; a diferença tornou-se um pouco menos pronunciada em um índice mais elevado da escória. As estruturas do ânion do silicato aluminoso presente nas fases de C-S-H no modelo e nos cimentos reais foram similares com 90% das escórias, mas muito diferentes com 50% das escórias.

DEJA [25] estudou a composição da microestrutura e da fase da escória hidratada e obteve a constatação de que a microestrutura apresentou uma quantidade mais elevada de índice de vazios comparada às pastas de cimento Portland padrão e, simultaneamente, uma quantidade significativamente mais baixa de poros capilares. A composição da microestrutura e da fase da escória

hidratada indicou que podem ser essenciais na imobilização dos metais pesados. As propriedades de pastas de escória ativada na presença dos íons Zn, Cd, Cr e Pb foram estudadas pelo teste de lixiviação. Os resultados indicaram que o grau imobilização do Cd, Zn e Pb foi muito elevado (excedendo 99.9%). Os valores para Cr^{6+} foram mais baixos (99.0%).

2.9 CALOR DE HIDRATAÇÃO

É denominado calor de hidratação a quantidade de calor (cal/g) que é desprendida durante as reações de hidratação dos compostos do cimento. Grande parte do calor de hidratação é atribuída aos componentes C3S e C3A, sendo influenciado, também, por outros fatores como o tipo de cimento, finura, temperatura e o tempo de hidratação. Sendo assim, o uso de cimentos com baixo calor de hidratação como o cimento com adição de escória é recomendado para trabalhos onde grandes volumes de concreto sejam requeridos.

LIDUÁRIO [26] estudou as contribuições de diferentes tipos de adições nas propriedades térmicas do concreto. Para este estudo, foram utilizados o cimento CP II F-32 e as adições minerais sílica ativa, metacaulim, escória de alto forno e pozolana de argila calcinada. Os resultados mostraram que o metacaulim contribuiu para o aumento do calor de hidratação, alcançando um percentual de 45% em relação à referência, no teor de 12%. A sílica ativa também aumentou o calor, no entanto, em um percentual máximo de 6%, para um teor de 4% na mistura. A condutividade térmica do concreto, por si só, é relativamente baixa, podendo assim liberar uma quantidade suficiente de calor para gerar fissuras. A pozolana e a escória contribuíram para a redução do calor, sendo que para a escória, houve uma maior redução do calor em relação à referência, em torno de 27% no teor de 60%. Para as propriedades térmicas do concreto endurecido, as adições apresentaram influência significativa. Para o calor específico, houve uma pequena diferença entre os concretos, tendo um aumento de 4,2% para o concreto com sílica ativa em relação à referência. A difusividade apresentou uma redução nos concretos com adição mineral, alcançando um percentual de 7,3% para o concreto com escória. Por fim, as adições minerais promoveram pequenos

aumentos no coeficiente de dilatação térmica, obtendo-se um percentual de 9,3% para o concreto com metacaulim.

2.10 TRABALHABILIDADE E REOLOGIA

A trabalhabilidade é uma importante característica do concreto e da argamassa no estado fresco, essa propriedade apresenta grande influência na qualidade do produto endurecido, como os defeitos de adensamento que atuam diretamente na queda de resistência.

Nas argamassas colantes o efeito da trabalhabilidade é sentido no momento da sua aplicação no substrato com o auxílio de uma desempenadeira dentada. Entende-se como uma argamassa com boa trabalhabilidade aquela que apresenta boa consistência, leveza para aplicação, boa formação dos cordões e um bom tempo em aberto.

As características supracitadas estão diretamente ligadas ao formato e à distribuição granulométrica dos agregados utilizados.

Percebe-se uma melhora da trabalhabilidade nas pastas de cimento Portland com adição de escória de alto forno, isto pode ser explicado pela característica dos grãos de escória, que embora sejam bem angulosos são bastante lisos e sem poeira ao contrário da maioria dos agregados.

COSTA [25] estudou o comportamento reológico das argamassas colantes tipo AC-I e estabeleceu uma relação entre o ensaio de deslizamento e o “squeeze flow”.

O método “squeeze flow” também foi utilizado por CARDOSO e CARBONE [28] para realizar a caracterização reológica de revestimentos à base de gesso. O equipamento de “squeeze flow” consiste em um reômetro adaptado para medir o comportamento reológico da argamassa. A argamassa fresca é colocada entre o prato e um molde rígido, aplica-se então uma força compressiva sobre essa argamassa e mede-se o esforço necessário para a compressão uniaxial da amostra cilíndrica do material entre duas placas paralelas. Com esse ensaio é possível determinar os parâmetros reológicos como viscosidade e tensão de escoamento.

2.11 REAÇÃO ÁLCALI AGREGADO

A reação álcali agregado é de natureza físico-química [1, 2] e é considerada lenta, ocorrendo em presença de água, entre os álcalis do cimento e alguns agregados reativos, causando o aparecimento de um gel expansivo na interface pasta-agregado e conseqüentemente, o fissuramento do concreto. Para minimizar essa reação pode-se fazer uso de cimentos com baixos teores de álcalis ou cimentos com adições de materiais que inibam ou minimizem a reação, dentre os quais se podem incluir as pozolanas e as escórias.

2.12 ATAQUE POR SULFATOS

O ataque ao cimento por sulfatos podem causar comprometimento da estrutura da obra devido à expansão causada pela cristalização da etringita. A etringita ($3\text{CaOAl}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) origina-se da reação dos sulfatos dissolvidos na água com o C3A do cimento. Na cristalização da etringita ocorre uma expansão. Quando a pressão dessa expansão atinge o limite de resistência à tração do concreto, aparecem fissuras que o deixam mais vulnerável e podem acelerar a sua deterioração. Os cimentos Portland com adição de escória de alto forno possuem alta resistência aos sulfatos, pois apresentam baixo teor de C3A e pequena liberação de Ca(OH)_2 limitando assim a formação da etringita expansiva [1, 2].

2.13 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A resistência à compressão das pastas de cimento depende de fatores como a finura do cimento, a qualidade do clínquer, a relação água/cimento, condições de cura e também dos tipos de adição [2]. As pastas de cimento Portland de alto forno apresentam resistências iniciais menores que as de cimento Portland comum porque a hidratação das escórias é mais lenta que a do clínquer, porém em idades mais avançadas a resistência a compressão do cimento Portland com adição de escória é superior ao cimento Portland comum, segundo o Boletim Técnico BT/PCC/115 da ABCP do ano de 1993.

BOURGUIGNON [29] estudou influência da resistência à compressão em concretos com diferentes teores de escória de alto forno. Neste trabalho, pesquisou-se a influência das classes de resistência à compressão na carbonatação natural e acelerada do concreto produzido com diferentes teores de escória de alto forno. A carbonatação do concreto é um dos mecanismos responsáveis pela sua menor durabilidade, sendo tanto maior quanto menor for a sua resistência. Entretanto, apesar de não causar danos aparentes ao concreto não armado, estabelece algumas condições necessárias para a corrosão das armaduras do concreto armado. As propriedades analisadas, massa específica, absorção, índice de vazios, resistência à compressão axial, profundidade de carbonatação natural e acelerada, tiveram seus resultados analisados estatisticamente e uma correlação entre o aumento da resistência característica do concreto e a diminuição da profundidade de carbonatação foi estabelecida. Com base nos resultados experimentais, para uma mesma classe de resistência, ficou comprovada a dependência do mecanismo da carbonatação da relação água/materiais cimentícios e a maior carbonatação das misturas com o cimento CP III-32 RS, com e sem a substituição de escória granulada de alto forno moída, quando comparadas às profundidades de carbonatação de concretos confeccionados com o cimento CP II E-32.

2.14 RETRAÇÃO DO CIMENTO DE ESCÓRIA ATIVADA

NETO [30] estudou a cinética das retrações autógena e por secagem não restringida do cimento de escória ativada em função, principalmente, do tipo e teor de ativadores empregados. O fenômeno da retração também foi analisado com base nos resultados dos ensaios de porosimetria, calorimetria, termogravimetria e DRX. Foram empregados como ativadores: silicato de sódio, cal hidratada + gipsita, cal hidratada e hidróxido de sódio. Como referência foi adotado o cimento Portland da alta resistência inicial CPV-ARI. De acordo com os resultados obtidos, a ativação da escória com silicato de sódio apresentou retração por secagem e autógena superior à apresentada pelos demais ativadores e pelo cimento Portland. Com base nos ensaios de microestrutura, foram determinantes para a elevada retração do cimento de escória ativada com

silicato de sódio: a baixa porosidade, caracterizada pela predominância quase total de mesoporos; o elevado grau de hidratação e a natureza dos produtos hidratados, com predominância quase total de silicato cálcio hidratado (C-S-H). Na ativação com cal e com cal mais gipsita, a composição diferente dos produtos hidratados (baixa formação de C-S-H e presença significativa de fases aluminato e sulfoaluminato, respectivamente) alterou a porosidade e a retração, principalmente a autógena que apresentou valores inferiores à do cimento Portland. A ativação com hidróxido sódio é caracterizada pela elevada retração autógena e baixa formação de C-S-H, com presença significativa de fases aluminato.

2.15 DURABILIDADE E RESISTÊNCIA À CORROSÃO

Estudos comprovaram que o concreto de cimento Portland com adição de escória de alto forno pode ser de dez a cem vezes menos permeável, que o cimento Portland comum. Sendo assim a entrada de íons agressivos foi dificultada, constituindo um fator importante à prevenção da corrosão. OSBORNE [31] estudou a durabilidade e o desempenho em longo prazo do concreto do cimento Portland com escória de alto forno e concluiu que o uso de escória de alto forno trouxe muitos benefícios técnicos aos usuário do concreto, tal como a redução do calor de hidratação, uma mais baixa permeabilidade e uma resistência à compressão mais elevada em idades mais elevadas, diminuição da penetração de íons de cloreto, aumento da resistência ao ataque do sulfato e reação álcali agregados.

JAUL, e TSAY [32] apresentaram um estudo onde a escória foi usada para substituir em até 50% em peso do cimento para fazer o concreto de cimento com escória. Os corpos de prova foram submetidos ao teste acelerado do ciclo molhado/seco por mais de um ano. A resistência à compressão, permeabilidade, a resistência elétrica, a concentração de íons do cloreto, o potencial de corrosão, e a distribuição de tamanho dos poros foram medidos em várias idades. Os resultados das análises mostraram que o concreto de escória com substituição 20-30% teve a melhor resistência de corrosão.

HOU, CHANG, HWANG [33], estudaram o efeito da capacidade anticorrosiva no concreto de alto desempenho pela reação pozolânica da escória. Os resultados mostraram que a reação pozolânica devido à adição de escória diminuiu a quantidade de hidróxido de cálcio, reduziu o volume dos poros capilares (PC) e abaixou sua permeabilidade, tornando o concreto mais durável e compacto.

BAKHAREV, SANJAYAN, CHENG [34] apresentaram em seu trabalho uma investigação na durabilidade do concreto com escória básica ativada (AAS) quando expostos à carbonatação. Encontraram como resultados que a resistência do concreto do AAS à carbonatação foi mais baixa do que aquela do concreto ordinário do cimento de Portland (OPC), e o AAS concreto teve uma perda da força e uma profundidade mais elevadas da carbonatação do que o concreto do OPC em ambos os testes.

2.16 INFLUÊNCIA DOS TEORES DE ÓXIDO DE MANGANÊS NAS ESCÓRIAS USADAS COMO ADIÇÃO NO CIMENTO PORTLAND

RAI, PRABAKAR, RAJU, MORCHALLE [35] avaliaram a possibilidade de usar escórias com altas e baixas concentrações de MnO_2 . A análise química para as escórias com altos teores de MnO mostraram que as amostras de escória possuíam baixos teores de CaO e Fe_2O_3 e altos teores de SiO_2 , Al_2O_3 , MnO_2 , MgO, Na_2O e K_2O , o que contribuiu tanto para a formação das reações pozolânicas quanto no desenvolvimento da resistência de composições misturadas do cimento de escória. Elevados teores de MnO (>15%) foram considerados impróprios para a adição em cimentos por causa de seus efeitos deletérios.

2.17 ADIÇÃO DE ESCÓRIA ACIÁRIA EM CIMENTO PORTLAND

DAL MOLIN GEYER e VILELA [36] estudaram a utilização de escória aciaria como adição em cimentos. O comportamento da escória de aço granulada como a adição mineral no cimento foi investigado de acordo com o padrão

brasileiro de NBR 72165 [37] nos teores de escória de aço definidos como: 0, 6, 20 e 34% da massa do clínquer. A proporção da mistura de cimento usada foi de 1:3 (aglomerante/agregado) e a relação da água/cimento de 0,48. A resistência à compressão avaliada nas idades de 3, 7, 28 e 91 dias indicou que os cimentos com escórias granuladas apresentaram resultados menores quando comparados aos cimentos da referência. Também, definiu-se que a influência da proporção da escória na resistência à compressão diminuiu quando a idade dos cimentos aumentou. Este fato foi relacionado ao desenvolvimento mais lento da resistência à compressão para os cimentos que continham proporções mais elevadas da escória.

2.18 EXPANSIBILIDADE DA ESCÓRIA ACIÁRIA

MACHADO [38] realizou um estudo comparativo dos métodos de ensaio (ASTM C 1260/04, ASTM D 4792/95, ASTM D 698, DNER-ME 228/89 e M 192/89, NBR 11582/91 e JIS 5015/92) para avaliação da expansibilidade das escórias aciarias. Nesse estudo ficou comprovada a elevada expansão da escória de aciaria a oxigênio, pela hidratação dos óxidos de cálcio e magnésio reativos e pela carbonatação dos produtos hidratados gerados. Comparando os métodos de ensaio observou-se que as principais diferenças estiveram centradas no tempo de ensaio, no tamanho e forma do corpo de prova, no critério de avaliação da expansibilidade e na distribuição granulométrica do material analisado.

2.19 UTILIZAÇÃO DE ESCÓRIA COMO AGREGADO

Conforme ARIVABENI [39], a escória de alto forno tem um grande potencial de utilização como agregado para concreto, apesar da heterogeneidade de material. A factibilidade técnica da utilização da escória de alto forno utilizada como agregado graúdo, da escória de alto forno utilizada como agregado miúdo e da escória de alto forno utilizada em substituição parcial ao cimento, foi apresentada por vários ensaios, análises e resultados comparativos aos concretos

convencionais. Um estudo do comportamento ambiental dos concretos produzidos com escória também foi elaborado, visando conhecer seus impactos e os benefícios que o encapsulamento da escória traz ao meio ambiente. Existiram limitações do seu uso como agregado, pelo risco do concreto ficar sujeito ao fogo ou ao calor intenso. Neste caso, a escória tendeu a desintegrar-se, comprometendo a estrutura.

COELHO [40] estudou a influência de elevados teores de escória de alto forno como adição mineral e agregado miúdo em concretos. Analisando seus resultados em termos de resistência à compressão axial, na resistência à tração por compressão diametral, no teor de ar incorporado, na massa específica, na absorção, no índice de vazios, na retração e na profundidade de carbonatação concluiu pela possibilidade de sua utilização com dosagem adequada e cura eficiente.

2.20 ADIÇÃO DE MATERIAIS RECICLADOS A CIMENTOS E CONCRETOS

AMORIM, LIRA e FERREIRA [41] estudaram o uso de resíduos de construção civil e resíduos da indústria de cerâmica vermelha, em argamassas alternativas, concluindo pela sua viabilidade técnica, com aumentos significativos na resistência à compressão das argamassas com o aumento da área de superfície das amostras do resíduo.

BIANCHINI, MARROCCHINO, ASSINARI, VACCARO [42], por determinação das diferentes granulometrias dos rejeitos verificaram que a fração reciclada na faixa de 0,6 a 0,125 mm pode ser diretamente reempregada na preparação de novas argamassas e concreto.

HEIKAL e HELMY [43] estudaram a adição de poeira de desvio de processo de produção de cimento e escória granulada ao cimento Portland. Os resultados indicaram que as propriedades reológicas do cimento Portland estiveram realçadas pela recolocação parcial pela escória granulada. O aumento na quantidade de poeira do cimento de desvio de processo aumentou a água exigida da consistência normal. Também, foi constatado que o tempo de pega da pasta do cimento de escória foi aumentado com o aumento no índice da escória.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais e métodos utilizados neste trabalho encontram-se descritos na sequência.

3.1 ESCÓRIA

As amostras de escória de alto forno foram provenientes de empresas do município de Cubatão, litoral do Estado de São Paulo, do município de Barcarena no Estado do Pará e do estado de Minas Gerais.

As escórias apresentavam-se em forma granulada e com um determinado teor de umidade. Foi necessário realizar a sua secagem em estufa a uma temperatura de 100 °C até obter-se massa constante.

Todas as amostras de escória passaram por um processo de moagem em um moinho de bolas, cujo equipamento encontra-se ilustrado na FIGURA 1, por um tempo de 90 minutos e na velocidade de 750 rpm , a fim de se obter a finura aproximada à do cimento Portland. O material de moagem foi composto por corpos moedores de aço que variam desde o diâmetro de 20 a 77 mm, conforme ANEXO 12.



FIGURA 1. MOINHO DE BOLAS UTILIZADO PARA MOAGEM DA ESCÓRIA GRANULADA

Na FIGURA 2, observam-se as amostras de escória na sua forma “in natura” e depois do processo de moagem.



FIGURA 2. A) ESCÓRIA DE ALTO FORNO SECA; E, B) ESCÓRIA DE ALTO FORNO MOÍDA.

Em seguida, as amostras foram submetidas ao teste de determinação da finura por intermédio do permeabilímetro de Blaine, conforme NBR NM 76 [44], que consiste em determinar o tempo que uma dada quantidade de ar leva para atravessar uma quantidade compacta de material, utilizando um aparelho de Blaine semi-automático da marca Tony Technik, modelo 6568, conforme mostrado na FIGURA 3.



FIGURA 3. PERMEABILÍMETRO DE BLAINE SEMI-AUTOMÁTICO.

Após a determinação da finura, as mesmas foram submetidas à caracterização química pela técnica de FRX. O material foi pulverizado e fundido em pastilha de bórax, sendo analisado em equipamento modelo Magi'X – Pro PW2540 da marca Phillips,

3.1.1 MÉTODO RÁPIDO PARA VERIFICAÇÃO DA REATIVIDADE DE ESCÓRIA DE ALTO FORNO

Para a realização do teste rápido de verificação e classificação das reatividades das amostras de escória, foi utilizado o microscópio Olympus BX51, mostrado na FIGURA 4, com luz refletida e transmitida com ocular de ampliação de 10 vezes e objetivas de ampliação de 10, 20, 40 e 100 vezes.



FIGURA 4. MICROSCÓPIO ÓPTICO OLYMPUS, MODELO BX 51

Para a realização do teste rápido e verificação da reatividade da escória segundo BATTAGIN [45], utilizou-se uma pequena fração de escória moída e peneirada com granulometria entre 63 e 53 μm , que foi pulverizada sobre uma lâmina com um líquido dispersante e recoberta com outra lâmina. A escória é tratada com uma solução aquosa a 4% de sulfato de alumínio.

O método teve por objetivo medir o tempo de início de formação de cristais de gipsita a partir da reação do cálcio disponível nas escórias com o sulfato de alumínio, segundo a reação:



Com essa técnica foi possível então classificar as escórias de acordo com a sua reatividade:

- alta reatividade - cristalização inferior a 3 minutos;
- média reatividade - cristalização de 3 a 5 minutos; e,
- baixa reatividade - cristalização superior a 5 minutos

3.2 AREIA

Foi utilizada uma amostra de areia beneficiada e seca para a produção das argamassas industrializadas. A amostra foi submetida aos ensaios para a determinação do material fino que passa pela peneira 75 μm por lavagem conforme NBR NM 46 [46] (FIGURA 5). Nesse ensaio a amostra de areia seca foi colocada em um balão de fundo chato e em seguida lavada com água e despejada na peneira 75 μm , onde ficou retida. A diferença entre o peso final e o peso inicial foi a quantidade de material fino que passou na peneira 75 μm .

O teste para a obtenção do teor de impureza orgânica foi desenvolvido conforme NBR NM 49 [47] adaptada para a ASTM C-40, com teste colorímetro ilustrado na FIGURA 6. Nesse ensaio uma amostra de areia foi misturada com uma solução de hidróxido de sódio a 3%, ficando em seguida em repouso e protegida da luz para posteriormente ser comparada com um padrão de cores que determina em ppm a quantidade de material orgânico presente na areia.

A determinação do módulo de finura consistiu no procedimento da soma das porcentagens acumuladas nas peneiras de série normal (76 a 0,15 mm) segundo procedimentos indicados na NBR NM 248 [48].



FIGURA 5. ÁGUA DE LAVAGEM CONTENDO SÓLIDOS EM SUSPENSÃO SENDO VERTIDA NA PENEIRA 75 μm , CONFORME ENSAIO DA NBR NM 46



FIGURA 6. COMPARAÇÃO DA AMOSTRA DE AREIA COM O PADRÃO DA ASTM C-40 - ENSAIO ADAPTADO À NBR NM 49

3.3 CIMENTO PORTLAND

Existem vários tipos de cimentos no Brasil, eles estão divididos como mostrado na TABELA 2, como cimento Portland comum, com maior grau de pureza e o cimento Portland composto (adições).

No cimento Portland composto tipo CP II-E ocorre a adição de escória granulada de alto forno. No CP II-F se tem a adição de materiais carbonáticos e, no CP II-Z, a adição de material pozzolânico ao clínquer.

TABELA 2. COMPOSIÇÃO DOS CIMENTOS COMUNS E DOS MATERIAIS UTILIZADOS, SEGUNDO A NBR 5732 [49] E 11578 [50]

TIPO DE CIMENTO PORTLAND	SIGLA	COMPOSIÇÃO (% EM MASSA)				NORMA BRASILEIRA
		CLÍNQUER + GESSO	ESCÓRIA GRANULADA DE ALTO FORNO (SIGLA E)	MATERIAL POZOLÂNICO (SIGLA Z)	MATERIAL CARBONÁTICO (SIGLA F)	
COMUM	CP I	100	-			NBR 5732
	CP I-S	99-95	1-5			
COMPOSTO	CP II-E	94-56	6-34	-	0-10	NBR 11578
	CP II-Z	94-76	-	6-14	0-10	
	CP II-F	94-90	-	-	6-10	

Na TABELA 3 e na TABELA 4, encontram-se apresentadas as exigências dos tipos de cimento de acordo com as normas brasileiras.

TABELA 3. EXIGÊNCIAS FÍSICAS DOS CIMENTOS

TIPO DE CIMENTO PORTLAND	CLASSE	FINURA		TEMPOS DE PEGA		EXPANSIBILIDADE		RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO				
		RESÍDUO NA PENEIRA 75 mm (%)	ÁREA ESPECÍFICA (m ² /kg)	INÍCIO (h)	FIM (h)	A FRIO (mm)	A QUENTE (mm)	1 DIA (MPa)	3 DIAS (MPa)	7 DIAS (MPa)	28 DIAS (MPa)	91 DIAS (MPa)
CP I	25	≤ 12	≥ 240	≥ 1,0	≤ 10 ⁽¹⁾	≤ 5 ⁽¹⁾	≤ 5	-	≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0	-
	32	≤ 10	≥ 260						≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0	
	40		≥ 280						≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 40,0	
CP II-E CP II-Z CP II-F	25	≤ 12	≥ 240	≥ 1,0	≤ 10 ⁽¹⁾	≤ 5 ⁽¹⁾	≤ 5	-	≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0	-
	32	≤ 10	≥ 260						≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0	
	40		≥ 280						≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 40,0	
CP III ⁽²⁾	25	≤ 8	-	≥ 1,0	≤ 12 ⁽¹⁾	≤ 5 ⁽¹⁾	≤ 5	-	≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 32,0 ⁽¹⁾
	32								≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0	≥ 40,0 ⁽¹⁾
	40								≥ 12,0	≥ 23,0	≥ 40,0	≥ 48,0 ⁽¹⁾
CP IV ⁽²⁾	25	≤ 8	-	≥ 1,0	≤ 12 ⁽¹⁾	≤ 5 ⁽¹⁾	≤ 5	-	≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 32,0 ⁽¹⁾
	32								≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0	≥ 40,0 ⁽¹⁾
CP V-ARI		≤ 6	≥ 300	≥ 1,0	≤ 10 ⁽¹⁾	≤ 5 ⁽¹⁾	≤ 5	≥ 14,0	≥ 24,0	≥ 34,0	-	-

Nota. 1) Ensaio facultativo.

TABELA 4 EXIGÊNCIAS QUÍMICAS DOS CIMENTOS

TIPO DE CIMENTO PORTLAND	RESÍDUO INSOLÚVEL (%)	PERDA AO FOGO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	CO ₂ (%)	S (%)
CP I	≤ 1,0	≤ 2,0	≤ 6,5	≤ 4,0	≤ 1,0	-
CP I-S	≤ 5,0	≤ 4,5			≤ 3,0	-
CP II-E	≤ 2,5	≤ 6,5	≤ 6,5	≤ 4,0	≤ 5,0	-
CP II-Z	≤ 16,0					-
CP II-F	≤ 2,5					-
CP III	≤ 1,5	≤ 4,5	-	≤ 4,0	≤ 3,0	≤ 1,0 ⁽¹⁾
CP IV ^{(2) (3)}	⁽⁴⁾	≤ 4,5	≤ 6,5	≤ 4,0	≤ 3,0	-
CP V-ARI	≤ 1,0	≤ 4,5	≤ 6,5	≤ 3,5 ≤ 4,5 ⁽⁵⁾	≤ 3,0	-

Notas. (1) Ensaio facultativo; (2) a atividade pozolânica do cimento, determinada conforme a NBR 5753 [60], deve ser positiva; (3) a atividade do material pozolânico, determinada conforme a NBR 5752 [61], deve ser maior que 75%; (4) o teor de material pozolânico deve ser determinado pelo ensaio de resíduo insolúvel; e, (5) o teor de SO₃ igual a 3,5% aplica-se quando C3A ≤ 8,0, e 4,5% quando C3A ≥ 8,0%.

Neste trabalho, foram utilizados dois tipos de cimento Portland; o CP II-F e o CP II-Z, comercializados no Brasil. Estes, foram escolhidos pela sua abundância no mercado, representando quase 80% da produção nacional.

O uso do cimento CP II-Z está fundamentado, também, nas suas características técnicas como de menor resistência inicial, menor calor de hidratação, maiores impermeabilidade, durabilidade e resistência aos meios agressivos, do que o CP II-F.

As amostras de cimento foram caracterizadas pelas análises físicas e químicas.

3.4 CAL

De acordo com a NBR 7175 [51], a cal hidratada pode ser classificada em três tipos: CH I, CH II e CH III, sendo que a cal CH III possui limites mais amplos para o anidrido carbônico (CO_2), para os óxidos totais na base não volátil e para os óxidos totais hidratados. Então, se o consumidor quiser uma cal mais "pura" ele deve adquirir uma CH I, já que para ser definida desta maneira, seus resultados obedecem a limites acima dos exigidos para a CH III. O tipo CH II tem características químicas intermediárias aos outros dois tipos.

Para esse trabalho foi utilizada uma cal tipo CH III que foi caracterizada pela análise de FRX.

3.5 ADITIVO

Foi utilizado como aditivo um éter de celulose (MHEC) metil hidróxi etil celulose de alta viscosidade, para atuar como retentor de água.

3.6 COMPOSIÇÕES

Foram definidos nas composições, os teores de cimento e aditivo nas proporções intermediárias das utilizadas nas argamassas colantes do tipo AC-I, para utilizá-las como amostra padrão.

Em seguida, foram fixadas as porcentagens de adição de escória à argamassa colante. Estas substituições foram realizadas em 5 teores diferentes, onde 1 é a substituição mínima e 5 a substituição total do cimento Portland (conforme TABELA 5), esse procedimento foi realizado para os dois tipos de cimento.

TABELA 5. DEFINIÇÃO DOS TRAÇOS DE ARGAMASSA

IDENTIFICAÇÃO	CAL (%)	CPII-Z (%)	CPII-F (%)	ESCÓRIA BAIXA REATIVIDADE (%)	ESCÓRIA MÉDIA REATIVIDADE (%)	ESCÓRIA ALTA REATIVIDADE (%)
Z0	-	25	-	0	-	-
Z1	-	20	-	5	-	-
Z2	-	15	-	10	-	-
Z3	-	10	-	15	-	-
Z4	-	5	-	20	-	-
Z5	-	0	-	25	-	-
F0	-	-	25	0	-	-
F1	-	-	20	5	-	-
F2	-	-	15	10	-	-
F3	-	-	10	15	-	-
F4	-	-	5	20	-	-
F5	-	-	0	25	-	-
Z6	-	20	-	-	5	-
Z7	-	15	-	-	10	-
Z8	-	10	-	-	15	-
Z9	-	20	-	-	-	5
Z10	-	15	-	-	-	10
Z11	-	10	-	-	-	15
E0	25	-	-	0	-	-
E1	20	-	-	5	-	-
E2	15	-	-	10	-	-
E3	10	-	-	15	-	-
E4	5	-	-	20	-	-
E5	0	-	-	25	-	-

Após esse processo as amostras foram pesadas nas proporções pré-definidas e misturadas em um misturador tipo Y, conforme mostrado na FIGURA 7, por um período de 30 minutos para cada amostra.

As amostras ficaram acondicionadas em um ambiente com temperatura e umidade controladas conforme NBR 14082 [7], até o momento do ensaio.

A porcentagem de água adicionada na mistura foi definida de acordo com a trabalhabilidade da argamassa, não sendo levado em consideração o ensaio de deslizamento.

As misturas das argamassas, as condições ambientais para execução dos ensaios e de cura, bem como os materiais utilizados foram realizados de acordo com a NBR 14082 [7]. O tempo de espera para a maturação foi de 15 minutos antes da aplicação da argamassa no substrato padrão.

Posteriormente, foram realizados os ensaios de viscosidade, determinação do tempo em aberto e determinação da resistência de aderência à tração conforme as NBR's 14083 [4] e 14084 [5].



FIGURA 7. MISTURADOR EM “Y” UTILIZADO PARA MISTURA DAS COMPOSIÇÕES

3.7 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO E DO TEMPO EM ABERTO

Para determinar as aderências dos diferentes traços estudados foram realizados os ensaios de determinação do tempo em aberto conforme NBR 14083 [4] e determinação da resistência de aderência à tração conforme NBR 14084 [5] – cura normal e submersa (por se tratar de uma argamassa colante de uso interno não foi avaliada a cura em estufa a 70 °C). Na FIGURA 8 encontram-se ilustradas as fases da preparação e desenvolvimento desses procedimentos.

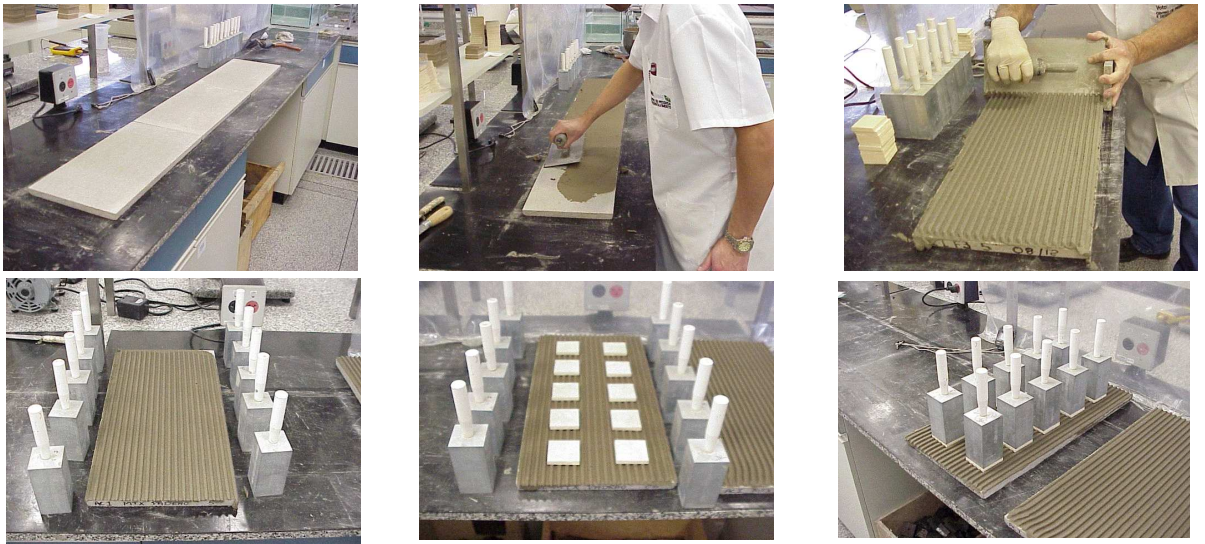


FIGURA 8. EXECUÇÃO DO ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DO TEMPO EM ABERTO E DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO

Para a realização do ensaio de tração direta sobre os traços de argamassas moldados utilizou-se um dinamômetro marca Proceq, modelo Dina Z6, ilustrado na FIGURA 9, a uma velocidade de carregamento de, aproximadamente, 250 N/s.



FIGURA 9. DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO - APARELHO PROCEQ DYNA Z6

O ensaio de determinação do tempo em aberto consiste na aplicação de uma argamassa colante industrializada, misturada de acordo com a NBR 14082

[7], com auxílio de uma desempenadeira dentada sobre um substrato padrão. Passados 15 minutos (AC-I), 20 minutos (AC-II e AC-III), ou tempo superior (tipo E), foram colocados sobre a argamassa 10 peças cerâmicas de base (50 x 50) mm, com absorção de água entre 12 a 18%. Em seguida, carregou-se cada peça cerâmica com uma massa padrão de 2 kg por um tempo de 30 s. Após esse procedimento, retiraram-se os pesos padrões e o excesso de argamassa da placa de substrato padrão, sendo que a placa moldada foi mantida em condições controladas de temperatura (21 a 25 °C) e umidade (56 a 64%) por 28 dias.

No 28º dia com o auxílio de um dinamômetro foi realizado o ensaio de tração direta sobre essas peças cerâmicas, então, foi calculada a média das 10 peças, e o resultado final expresso em MPa correspondeu ao valor da resistência de aderência para o tempo em aberto da argamassa.

O termo tempo em aberto consiste no tempo máximo em que a argamassa conserva suas propriedades mínimas de aderência contadas após a abertura de um “pano” de argamassa fresca sobre um substrato de concreto.

No caso da argamassa colante tipo AC-I, a resistência de aderência devem ser maior ou igual a 0,5 MPa aos 15 minutos, conforme recomendado na NBR 14081 [3].

Para a determinação da resistência à tração da cura normal a argamassa permaneceu sob as condições descritas anteriormente por 28 dias, o que mudou foi, somente, o tempo para o carregamento inicial (5 minutos para todos os tipos de argamassa colante) e a absorção de água das peças cerâmicas utilizadas que possuíram uma menor faixa (3 a 5%).

No procedimento de cura normal foram reproduzidas as condições médias de temperatura e umidade a que uma argamassa colante está sujeita.

Para a cura submersa o procedimento de ensaio foi igual ao da cura normal. Entretanto para este tipo de ensaio a placa de substrato padrão permaneceu 7 dias em condições controladas de laboratório e 21 dias submersa em um tanque de água com temperatura entre 21 e 25 °C. Neste caso, procurou-se reproduzir as condições de um revestimento cerâmico submetido a uma condição hídrica severa, tais como em cozinhas, banheiros e lavanderias.

Na cura em estufa a placa moldada deve permanecer por 14 dias em condições controladas de laboratório e 14 dias em uma estufa com circulação de

ar forçada a uma temperatura de 70 °C. O objetivo desse ensaio é avaliar a aderência da argamassa quando aplicada em áreas externas, portanto só se aplica para argamassas do tipo II e III.

3.8 ENSAIOS FÍSICOS E MECÂNICOS

Os ensaios físicos e mecânicos para caracterização das amostras de cimento seguiram os procedimentos e NBR's descritos na sequência.

A determinação da massa específica foi realizada de acordo com a NM 23, [52] esse ensaio consistiu em medir o deslocamento causado por uma quantidade conhecida de amostra num frasco de Le Chatelier inicialmente preenchido com líquido não reagente.

A determinação da finura pelo método de Blaine foi realizada de acordo com a NM 76 [44]. A superfície específica do cimento foi determinada observando-se o tempo requerido para uma determinada quantidade de ar fluir através de uma camada de cimento ou material fino compactada, de dimensões e porosidade especificadas.

Esse ensaio foi importante para se conhecer a velocidade de reação: quanto mais fino o cimento, maior a área total de superfície disponível para a hidratação e, por consequência, maior foi a velocidade no aumento da resistência. Este aumento de velocidade de reação também deve ser conhecido e controlado, pois acarreta em grande aumento de temperatura e, conseqüentemente, no desprendimento de calor, o que pode causar fissuração na peça concretada.

O ensaio de determinação da pasta de consistência normal foi realizado de acordo com a NM 43 [53]. A consistência da pasta é função da quantidade de água adicionada, da finura do material, da composição mineralógica, tipos e teores de adição, etc.

A determinação da consistência foi realizada pela sonda de Tetmajer, onde se avaliou seu grau de penetração na massa de cimento.

O ensaio de determinação da expansibilidade foi realizado de acordo com a NBR 11582 [54], a expansão ocorre pela hidratação do CaO.

Para determinar a expansibilidade da pasta de cimento, utilizou-se a agulha de Le Chatelier. A expansibilidade foi avaliada pela diferença entre as aberturas da agulha de Le Chatelier, antes e depois do aquecimento. Esse ensaio foi importante para prever e evitar determinadas patologias, conseqüentes da expansibilidade do concreto em obras.

O ensaio de determinação do tempo de pega foi realizado de acordo com a NM 65 [55]. O tempo que demanda da colocação da água no cimento até o seu início de pega, é o tempo onde a pasta de cimento, a argamassa ou o concreto podem ser trabalhados, transportados, lançados e adensados sem prejudicar o seu desempenho. Da mesma forma, o tempo que decorre do início de pega até o fim de pega, é o período onde a pasta, a argamassa e o concreto podem ter acabamentos finais e receber a cura. O ensaio de tempo de pega indica se a pasta está ou não dentro de um processo de hidratação normal. Sulfatos (provenientes do gesso ou outras fontes) no cimento regulam o tempo de pega, mas o tempo de pega é também afetado pela finura do cimento, pela relação água/cimento, temperatura e umidade do ambiente do ensaio e, alguns tipos de aditivos que podem ser utilizados tanto no cimento quanto no concreto.

O ensaio para a determinação do índice de finura por peneirador aerodinâmico foi realizado de acordo com a NBR 12826 [56], que consiste na separação da amostra em duas porções, sendo uma composta por partículas maiores do que a abertura da malha da peneira (que ficarão retidas) e, a outra, pelas partículas menores (passantes na peneira). A finura do cimento influencia a sua reação com a água. Quanto mais fino o cimento, maior será sua área específica.

O ensaio de resistência à compressão foi executado de acordo com a NBR 72165 [37]. A resistência à compressão é influenciada pelo tipo de cimento, mais precisamente, pela sua composição e pela finura.

As normas relatam que cada tipo de cimento deve atender a uma resistência mínima especificada a certa idade. A determinação da resistência à compressão do cimento é feita pelas seguintes etapas: moldagem dos corpos-de-prova; cura; capeamento e ruptura. A partir deste é possível avaliar a reatividade do clínquer e verificar a qualidade da pozolana e da escória.

3.9 DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX)

Esta técnica foi utilizada para caracterizar as espécies cristalinas formadas nas diferentes composições de argamassas testadas para a escória de baixa reatividade para os cimentos CII-Z e CII-F, na idade de 28 dias.

As análises foram realizadas utilizando para a identificação das fases o equipamento X'Pert da marca Phillips, conforme ilustrado na FIGURA 10.



FIGURA 10. DIFRATÔMETRO DE RAIOS X, MODELO X-PERT, MARCA PHILIPS

Os parâmetros empregados para essa análise foram: tempo de varredura de 10 minutos e velocidade de contagem de 20 s por passo em ângulos 2θ entre 5 graus e 70 graus e com tempo de passo de 0,016 graus/segundo. Como fonte de raios X foi utilizado o tubo cerâmico com anodo de cobre, com comprimento de onda de $1,540598 \text{ \AA}$, na potência máxima de 1600 W.

3.10 FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X (FRX)

Esta técnica foi utilizada para caracterizar quimicamente as amostras de escória, cimento e cal.

As análises semiquantitativas das amostras, foram realizadas utilizando um equipamento de fluorescência de raios X, modelo Magi'X – Pro PW2540 da marca Phillips, conforme mostrado na FIGURA 11.



FIGURA 11. EQUIPAMENTO DE FUORESCÊNCIA DE RAIOS X (FRX), MODELO MAGIX PRO DA MARCA PHILIPS

3.11 MICROSCOPIA ELÊTRONICA DE VARREDURA – MEV

Para essas análises foi utilizado um microscópio Philips, modelo XL 30, com microsonda analítica de raios X, marca EDAX.

O preparo das amostras foi feito com o recobrimento superficial em carbono grafite na superfície de fratura.

Foram analisados os traços de argamassa com escória de baixa reatividade e os cimentos do tipo CPII-Z e CPII-F, na idade de 28 dias.

3.12 ANÁLISE DE METAIS E ENSAIO DE LIXIVIAÇÃO

O ensaio de determinação de metais e lixiviação foi realizado pelos métodos de determinação de elementos por chama, determinação de elementos por geração de hidretos e determinação de elementos pelo forno de grafite.

O método utilizado para determinação de fluoretos foi o de íons seletivos e o procedimento para a obtenção do extrato lixiviado foi realizado de acordo com a NBR 10005 [57]. A classificação das amostras de resíduos sólidos foi obtida de acordo com a NBR 10004 [58].

3.13 ENSAIO PARA A DETERMINAÇÃO DA VISCOSIDADE

A determinação da viscosidade foi realizada em um viscosímetro Brookfield, modelo DV-II +.

Para cada amostra foram feitas 200 leituras com um intervalo de tempo de 2 s, utilizando o “Helipath spindle D”, equipamento mostrado na FIGURA 12, a uma velocidade de 6 rpm.

Esse ensaio foi realizado para avaliar as características das adições no estado fresco, bem como compará-las com os padrões.



FIGURA 12. VISCOSIMETRO BROOKFIELD MODELO DVII+

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS ESCÓRIAS

Os resultados da caracterização das amostras de escória por FRX estão apresentados na forma de óxidos na TABELA 6.

TABELA 6. CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DA ESCÓRIA POR FRX

Amostra	Escória A	Escória B	Escória C
Na ₂ O (%)	0,15	0,16	0,25
MgO (%)	1,25	5,00	4,79
Al ₂ O ₃ (%)	11,78	13,21	12,94
SiO ₂ (%)	37,90	34,89	37,40
P ₂ O ₅ (%)	0,01	0,03	0,02
SO ₃ (%)	2,47	1,94	1,92
K ₂ O (%)	0,37	0,42	0,54
CaO (%)	42,14	41,48	39,57
TiO ₂ (%)	0,25	1,16	0,78
MnO (%)	0,26	0,75	0,68
Fe ₂ O ₃ (%)	3,19	0,53	0,72
Co ₃ O ₄ (%)	0,00	0,05	0,00
SrO (%)	0,08	0,19	0,11
ZrO ₂ (%)	0,04	0,04	0,04
Y ₂ O ₃ (%)	0,00	0,01	0,01
Cl (%)	0,00	0,00	0,08
BaO (%)	0,11	0,15	0,16
Soma	100,00	100,00	100,00

Analisando-se os resultados apresentados na TABELA 6, pode-se concluir que as três amostras de escória são muito parecidas em termos de composição química, sendo as principais diferenças nos teores de óxido de ferro (mais alto) e óxido de magnésio (mais baixo) da escória A.

Na TABELA 7, encontram-se apresentados os resultados da análise quantitativa do grau de vitrificação das escórias. A determinação do grau de vitrificação (teor percentual complementar) tem a finalidade de caracterizar a reatividade da escória. Quanto maior o seu grau mais reativa é a escória. Assim, apesar das composições químicas terem sido similares, pode-se notar que a escória C apresentou-se como sendo a menos reativa.

TABELA 7. ANÁLISE QUANTITATIVA DO GRAU DE VITRIFICAÇÃO DAS ESCÓRIAS

AMOSTRAS	ESCÓRIA A	ESCÓRIA B	ESCÓRIA C
GRAU DE VITRIFICAÇÃO (%)	98,07	99,71	96,59
ÍNDICE DE REFRAÇÃO	1,63	1,63	1,63
NATUREZA	BÁSICA	BÁSICA	BÁSICA

Outra análise que pode ser abordada diz respeito ao grau de alcalinidade da amostra, para esse estudo preferiu-se trabalhar com escórias alcalinas, pois as escórias ácidas apresentam elevada instabilidade volumétrica, provocada pela hidratação do MgO reativo e do CaO livre, quando em contato com a umidade.

Na TABELA 8, constam os resultados de finura das escórias, medidas pelo permeabilímetro de Blaine.

TABELA 8. RESULTADOS DA DETERMINAÇÃO DA FINURA DAS ESCÓRIAS PELO MÉTODO DE BLAINE

AMOSTRAS	BLAINE (cm ² /g)
ESCÓRIA A	4360
ESCÓRIA B	4090
ESCÓRIA C	4640

As amostras de escória *in natura* foram moídas previamente ao teste de modos a se chegar a uma distribuição granulométrica média próxima da apresentada pelos cimentos.

As três amostras passaram pelo mesmo processo de moagem, com tempos iguais, no entanto, não foi possível obter uma distribuição granulométrica média constante entre as três amostras, portanto decidiu-se utilizar as amostras com o grau de finura apresentado na TABELA 8.

Na TABELA 9, bem como na FIGURA 13 e na FIGURA 14, observam-se os resultados do teste de reatividade realizado utilizando o microscópio óptico por meio da técnica de Milchensen, previamente descritos na página 25.

De acordo com BATTAGIN [45], a contagem do tempo de formação da gipsita ao se atacar a escória com uma solução de sulfato de alumínio é um teste rápido para determinar a reatividade das escórias, sendo assim os resultados desse ensaio, apresentaram a escória C como a menos reativa, conforme já havia sido apontada pela análise do grau de vitrificação.

Apresentaram-se, ainda, a escória B como sendo de média reatividade com um tempo de 4 minutos e a escória A, também de média reatividade. Porém com um tempo de reação muito próximo do limite de uma escória de alta reatividade.

Devido a semelhança na composição química das 3 amostras de escória decidiu-se fazer a análise de metais, conforme ilustrado na TABELA 10, somente para a escória C. Essa decisão foi tomada por ser essa a escória menos reativa, e porque é a escória base desse estudo.

TABELA 9. ANÁLISE QUANTITATIVA DO GRAU DE CRISTALIZAÇÃO DAS ESCÓRIAS

AMOSTRAS	ESCÓRIA A	ESCÓRIA B	ESCÓRIA C
TEMPO Min:seg	03:10	04:00	> 5:00
REATIVIDADE	MÉDIA	MÉDIA	BAIXA



FIGURA 13. ASPECTOS DA FRAÇÃO 100 µm DA ESCÓRIA, SOB MICROSCÓPIO DE LUZ TRANSMITIDA

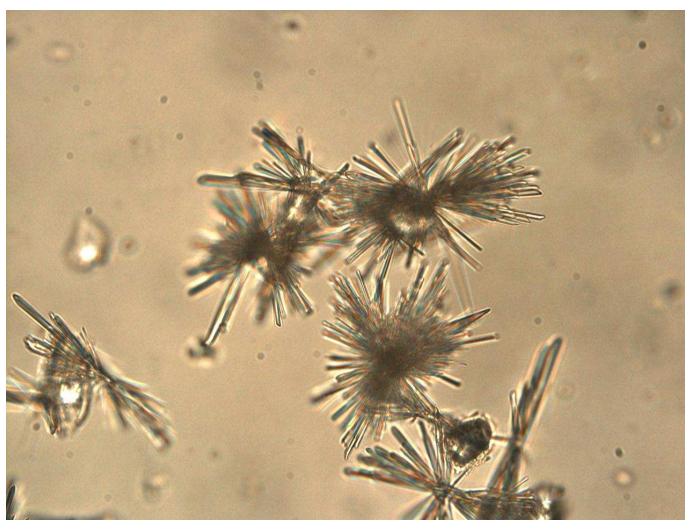


FIGURA 14. DETALHE DA CRITALIZAÇÃO DA GIPSITA, AMOSTRA TRATADA COM SOLUÇÃO AQUOSA DILUÍDA DE SULFATO DE ALUMÍNIO – AUMENTO 40 VEZES

TABELA 10. ANÁLISE DE METAIS – MASSA BRUTA – ESCÓRIA C

Composição Química		Teor (mg/kg)	Limite detecção mg/kg
Cádmio	Cd	1,61	0,004
Tálio	Ti	N.D	0,10
Arsênio	As	0,03	0,02
Cobalto	Co	N.D	7,00
Níquel	Ni	N.D	5,00
Selênio	Se	0,08	0,02
Telúrio	Te	N.D	20,00
Antimônio	Sb	N.D	0,02
Chumbo	Pb	6,25	5,00
Cromo	Cr	32,28	10,00
Cobre	Cu	N.D	4,00
Manganês	Mn	7464,50	2,00
Estanho	Sn	0,72	0,15
Berílio	Be	N.D	1,00
Mercúrio	Hg	N.D	2,00
Zinco	Zn	20,86	2,00

Na TABELA 11, pode-se observar o teor de metais lixiviados da escória C.

Analizando os resultados finais dessas tabelas observou-se que as amostras encontraram-se dentro dos limites especificados pela NBR 10.004 [58]. E, que os metais pesados encontrados nas escórias ficam retidos na estrutura da escória, não havendo assim a preocupação com a lixiviação de metais pesados para o meio ambiente.

TABELA 11. TEOR DE METAIS LIXIVIADOS – ESCÓRIA C

Composição Química		Teor (mg/L)	Limite detecção mg/L	NBR10004 mg/L
Cádmio	Cd	N.D	0,00	0,5
Mercúrio	Hg	N.D	0,0001	0,1
Arsênio	As	0,02	0,00	1
Selênio	Se	0,00	0,00	1
Prata	Ag	0,00	0,00	5
Bário	Ba	3,86	0,50	70
Cromo	Cr	0,06	0,001	5
Chumbo	Pb	0,00	0,00	1
Fluoreto	F-	3,52	0,02	150
pH	-	8,43	-	-

4.2 CARACTERIZAÇÃO DA AREIA

Na TABELA 12, encontram-se listados os resultados de caracterização da amostra de areia utilizada nesse estudo.

TABELA 12. CARACTERIZAÇÃO DA AREIA UTILIZADA

ENSAIOS	RESULTADOS
MÓDULO DE FINURA	0,93
MASSA ESPECÍFICA	2,65 g/cm ³
IMPUREZA ORGÂNICA	≤ 100 ppm
MAT. FINO < 75µm	0,10%

A areia analisada apresentou um baixo módulo de finura e, ainda, baixos teores de impureza orgânica e material fino que passa na peneira 75 µm.

Ressalta-se que resultados elevados de impureza orgânica e material fino que passa na peneira 75 µm podem prejudicar a resistência de aderência à tração das argamassas colantes. Sendo que o limite de impurezas orgânicas para utilização da areia em argamassas é de 300 ppm e de 3% para o material fino que passa na peneira 75 µm, conforme NBR 7211 [59].

Conclui-se que a areia utilizada apresentou excelente qualidade para o desenvolvimento desse trabalho.

4.3 CARACTERIZAÇÃO DO CIMENTO PORTLAND

Nas TABELAS 13 a 16, encontram-se apresentados os resultados de caracterização química e física das amostras de cimento utilizadas.

TABELA 13. RESULTADOS QUÍMICOS POR FRX DAS AMOSTRAS DE CIMENTO

AMOSTRA	CIMENTO CP II-F 32	CIMENTO CPII Z-32
SiO ₂ (%)	19,03	19,24
Al ₂ O ₃ (%)	4,60	4,37
Fe ₂ O ₃ (%)	3,22	6,18
CaO(%)	60,84	57,27
MgO(%)	3,20	3,79
Na ₂ O(%)	0,15	0,07
K ₂ O(%)	1,22	0,82
SO ₃ (%)	3,23	2,68
MN ₂ O ₃ (%)	0,18	0,03
P ₂ O ₅ (%)	0,16	0,15
TiO ₂ (%)	0,27	0,31
ZnO(%)	0,01	0,03
Cr ₂ O ₃ (%)	0,01	0,02
SrO(%)	0,19	0,11
Perda ao fogo(%)	3,59	5,43
SOMA(%)	99,88	100,49

As principais diferenças nas composições químicas das amostras de cimento utilizadas foram nos teores de óxido de ferro e óxido de cálcio.

Segundo ANDRIOLO [62], uma maior quantidade de CaO pode causar efeitos indesejados tais como a expansão criada a partir da liberação de seu calor de hidratação.

Analisando a TABELA 14 percebe-se que a amostra de CP II-Z possuiu uma maior superfície específica que o CPII-F.

Na TABELA 15, verifica-se que o cimento CP II-Z possuiu um menor tempo de pega e um menor índice de finura, sendo tais características impactantes nas resistências iniciais da argamassa colante AC-I

Finalmente, analisando as TABELAS 13, 14 e 16 concluiu-se que devido à maior superfície específica do cimento CP II-Z, o mesmo apresentou um maior

índice de consistência e uma maior resistência à compressão em todas as idades, vindo a se aproximar do CII-F somente aos 28 dias de cura.

TABELA 14. MASSA ESPECÍFICA, FINURA POR BLAINE, ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA E EXPANSIBILIDADE

AMOSTRA	MASSA ESPECÍFICA (g/cm ³)	BLAINE (cm ² /g)	CONSISTÊNCIA (%)	EXPANSIBILIDADE (mm)
CP II-Z	3,10	4269	28,4	0,0
CP II-F	3,12	3810	25,9	0,0

TABELA 15. TEMPO DE PEGA E ÍNDICE DE FINURA POR PENEIRADOR AERODINÂMICO

AMOSTRA	TEMPO DE PEGA (min)		ÍNDICE DE FINURA (%)	
	INÍCIO	FIM	# 200	#325
CPII-Z	130	190	1,7	6,0
CPII-F	160	215	2,1	10,7

TABELA 16. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

AMOSTRA	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)			
	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
CP II-Z	22,6	31,7	35,6	42,8
CP II-F	13,8	24,0	29,4	41,9

4.4 CARACTERIZAÇÃO DA CAL HIDRATADA

Na TABELA 17, estão apresentados os resultados da análise de FRX para a amostra da cal CH III, utilizada nesse estudo. O cálculo da porcentagem de óxidos totais na base de não voláteis (CaO + MgO) resultou em 94,31%. Quanto maior foi a fração de impurezas presentes na amostra, menor a fração de óxidos totais. O limite mínimo de óxidos totais recomendado na NBR 7175 [50] é

superior a 88%. Dentro deste limite pode-se considerar que a amostra de cal CH III foi de boa qualidade.

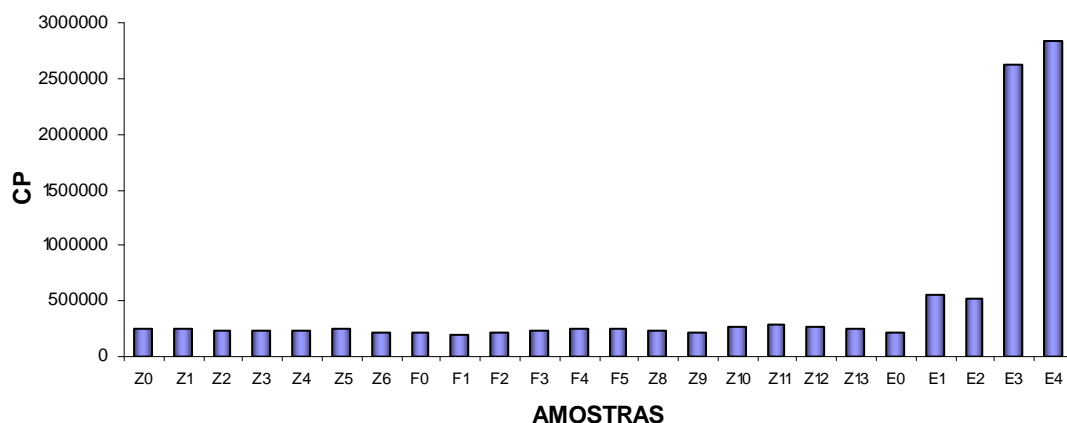
TABELA 17. CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DA CAL POR FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X

AMOSTRA	CAL HIDRATADA CH III
MgO (%)	9
Al ₂ O ₃ (%)	0,5
SiO ₂ (%)	2,71
P ₂ O ₅ (%)	0,07
SO ₃ (%)	0,24
K ₂ O(%)	0,19
CaO (%)	62,62
MnO (%)	0,06
Fe ₂ O ₃ (%)	0,45
SrO (%)	0,1
Perda ao fogo(%)	24,06
SOMA(%)	100

4.5 VISCOSIDADE DOS TRAÇOS

Na FIGURA 15, encontram-se apresentados os dados de viscosidade dos traços de argamassas com incorporações de diferentes teores de adição de escória e cal. Concluiu-se que a viscosidade dos traços de argamassa testados não se alterou com a variação no teor de escória, exceto nas amostras contendo adições de cal CH III (a partir do E1), isso pode ser explicado pela grande superfície específica da cal, havendo a necessidade de uma maior quantidade de água para molhar todas as partículas sólidas.

VISCOSIDADE ARGAMASSAS



*a amostra E5 não foi analisada, devido à péssima trabalhabilidade do traço.

FIGURA 15. GRÁFICO REPRESENTATIVO DAS VISCOSIDADES OBTIDAS VARIANDO-SE AS ADIÇÕES DE ESCÓRIA

4.6 RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO E TEMPO EM ABERTO PARA AS COMPOSIÇÕES DE ARGAMASSA

Para avaliar a influência dos tipos de cimentos na resistência de aderência à tração e tempo em aberto foram testados 5 teores diferentes de adições da escória de baixa reatividade para o cimento CII-Z e 5 para o CII-F. Os valores resultantes dessas adições podem ser vistos nas TABELAS 18, 19 e nas FIGURAS 16 e 17.

TABELA 18. RESISTÊNCIA À ADERÊNCIA À TRAÇÃO E TEMPO EM ABERTO PARA AS COMPOSIÇÕES DE CII-Z E A ESCÓRIA C – BAIXA REATIVIDADE

IDENTIFICAÇÃO	CIMENTO (%)	ESCÓRIA (%)	TEOR DE ÁGUA (%)	RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO E TEMPO EM ABERTO (MPa)		
				NORMAL	SUBMERSA	15'
Z0	25	0	21	1,2	0,8	1,1
Z1	20	5	21	1,3	1,0	1,2
Z2	15	10	21	0,9	1,0	0,9
Z3	10	15	21	1,0	0,8	0,9
Z4	5	20	21	0,9	0,6	0,7
Z5	0	25	21	0,2	0,5	0,2

RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO - CII-Z E ESCÓRIA C

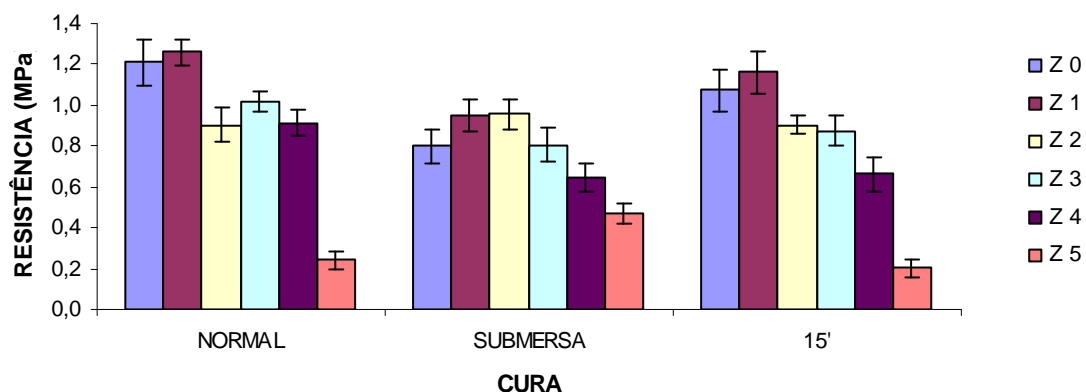


FIGURA 16. RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO DAS COMPOSIÇÕES DE CII- Z E A ESCÓRIA C

Conforme mostrado na TABELA 18, a amostra Z0 corresponde à amostra padrão, composta por cimento Portland CII-Z e areia de quartzo, sem adição de escória.

A substituição Z1 apresentou o melhor desempenho, porém, observou-se que os resultados das amostras Z2 à Z4 também foram satisfatórios, atendendo aos valores de resistência de aderência à tração e tempo em aberto, estabelecidos pela NBR 14081 [1] (TABELA 1). A amostra Z5 apresentou o pior desempenho aos 28 dias.

Conforme mostrado na TABELA 19, a amostra F0 corresponde à amostra padrão com cimento Portland CII-F e areia de quartzo, sem adição de escória.

As substituições F1 à F3 apresentaram resultados de aderência, semelhantes à amostra padrão, com uma leve queda de desempenho quando foi aumentada a adição de escória.

O resultado da amostra F4 também foi satisfatório, atendendo aos valores de resistência de aderência à tração e de tempo em aberto, estabelecidos pela NBR 14081 [1].

TABELA 19. RESISTÊNCIA À ADERÊNCIA À TRAÇÃO E TEMPO EM ABERTO PARA AS COMPOSIÇÕES DE CPII-F E A ESCÓRIA C – BAIXA REATIVIDADE

IDENTIFICAÇÃO	CIMENTO (%)	ESCÓRIA (%)	TEOR DE ÁGUA (%)	RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO E TEMPO EM ABERTO (MPa)		
				NORMAL	SUBMERSA	15'
F0	25	0	21	1,7	1,0	1,3
F1	20	5	21	1,7	1,1	1,2
F2	15	10	21	1,4	1,0	1,4
F3	10	15	21	1,2	1,0	1,2
F4	5	20	21	1,1	0,7	0,9
F5	0	25	21	0,3	0,5	0,2

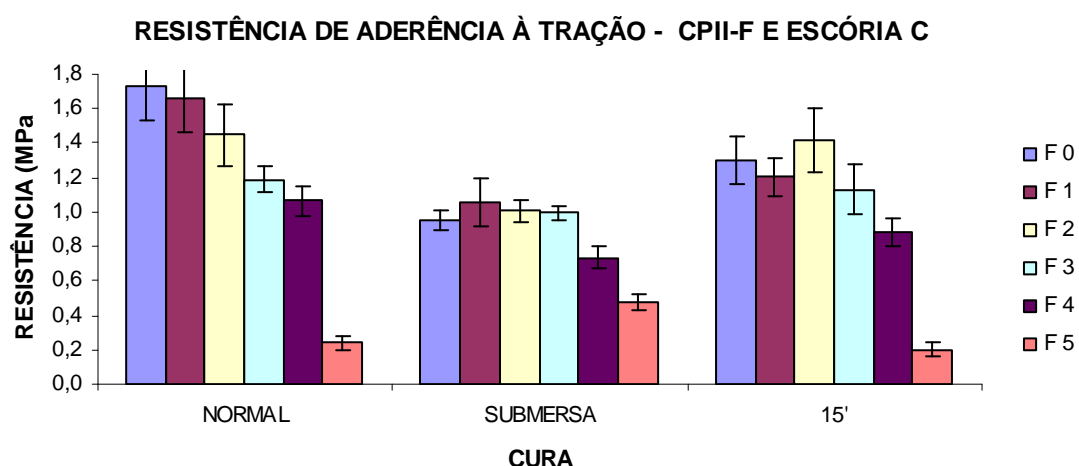


FIGURA 17. RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO DAS COMPOSIÇÕES DE CPII- F E A ESCÓRIA C

Uma vez avaliada a influência do tipo de cimento na resistência de aderência à tração e do tempo em aberto das argamassas colantes, avaliou-se também a influência da reatividade das escórias. Foram escolhidos os 3 traços que tiveram os melhores resultados com a escória de baixa reatividade (5, 10 e 15%). Optou-se por fixar o cimento CPII - Z como padrão, os testes foram realizados com a escória de média e alta reatividade. Os resultados contidos nas TABELAS 20 e 21 e nas FIGURAS 18 e 19 foram comparados com os resultados obtidos da escória de baixa reatividade da TABELA 18.

Conforme ilustrado nas TABELAS 19 e 20, a amostra Z0 corresponde à amostra padrão com cimento Portland CPII-Z e areia de quartzo, sem adição de escória.

Analisando as substituições Z6 a Z8 observou-se uma manutenção nos módulos de resistência para a cura submersa e um leve decréscimo para a cura normal e de tempo em aberto, com o aumento da substituição.

Os três teores testados apresentaram resultados satisfatórios, atendendo aos valores de resistência de aderência à tração e tempo em aberto, estabelecidos pela NBR 14081 [3].

Analisando as substituições Z9 a Z11 observou-se, novamente, um pequeno ganho de resistência para a cura submersa e um leve decréscimo para a cura normal e tempo em aberto, com o aumento da substituição.

Os três teores testados apresentaram resultados satisfatórios, atendendo aos valores de resistência de aderência à tração e tempo em aberto, estabelecidos pela NBR 14081 [1].

TABELA 20. RESISTÊNCIA À ADERÊNCIA À TRAÇÃO E TEMPO EM ABERTO PARA AS COMPOSIÇÕES DE CII-Z E A ESCÓRIA B – MÉDIA REATIVIDADE

IDENTIFICAÇÃO	CIMENTO (%)	ESCÓRIA (%)	TEOR DE ÁGUA (%)	RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO E TEMPO EM ABERTO (MPa)		
				NORMAL	SUBMERSA	15'
Z0	25	0	21	1,2	0,8	1,1
Z6	20	5	21	1,2	0,8	1,0
Z7	15	10	21	1,0	0,9	1,0
Z8	10	15	21	1,0	0,9	0,8

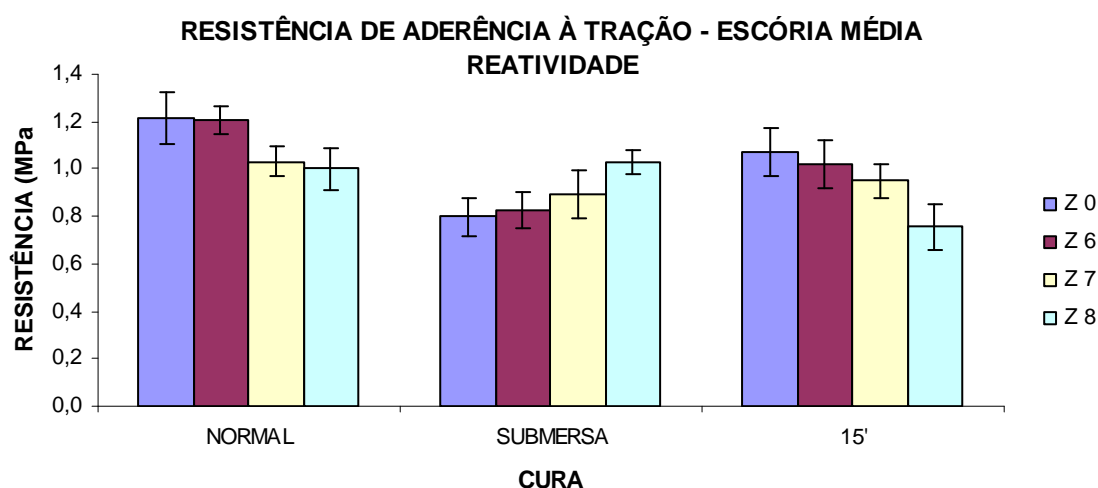


FIGURA 18. RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO DAS COMPOSIÇÕES DE CII- Z E A ESCÓRIA B

TABELA 21. RESISTÊNCIA À ADERÊNCIA À TRAÇÃO E TEMPO EM ABERTO PARA AS COMPOSIÇÕES DE CPII-Z E A ESCÓRIA A – MAIOR REATIVIDADE

IDENTIFICAÇÃO	CIMENTO (%)	ESCÓRIA (%)	TEOR DE ÁGUA (%)	RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO E TEMPO EM ABERTO (MPa)		
				NORMAL	SUBMERSA	15'
Z0	25	0	21	1,2	0,8	1,1
Z9	20	5	21	1,1	0,8	0,9
Z10	15	10	21	1,0	0,9	0,7
Z11	10	15	21	1,0	0,9	0,7

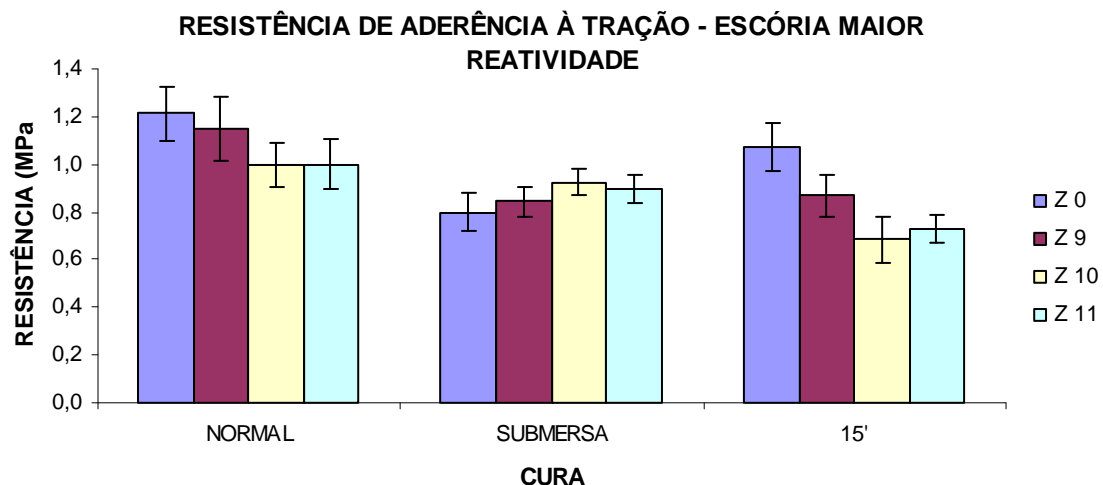


FIGURA 19. RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO DAS COMPOSIÇÕES DE CPII- Z E A ESCÓRIA A

Para comprovar a importância da cal como ativador das escórias foi desenvolvida mais uma série de amostras, iniciando-se pela amostra padrão composta pela escória C e areia de quartzo e as demais adições de cal CH III, conforme listagem apresentada na TABELA 22 e na FIGURA 20.

TABELA 22. RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À ADERÊNCIA À TRAÇÃO E TEMPO EM ABERTO PARA AS COMPOSIÇÕES DE CAL CH-III E A ESCÓRIA C – MENOR REATIVIDADE

IDENTIFICAÇÃO	ESCÓRIA (%)	CAL (%)	TEOR DE ÁGUA (%)	RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO E TEMPO EM ABERTO (MPa)		
				NORMAL	SUBMERSA	15'
E0	25	0	21	0,2	0,5	0,2
E1	20	5	21	0,5	0,8	0,4
E2	15	10	21	0,5	0,8	0,2
E3	10	15	23	0,4	0,4	0,2
E4	5	20	25	0,3	0,2	0,0
E5	0	25	27	0,2	0,0	0,0

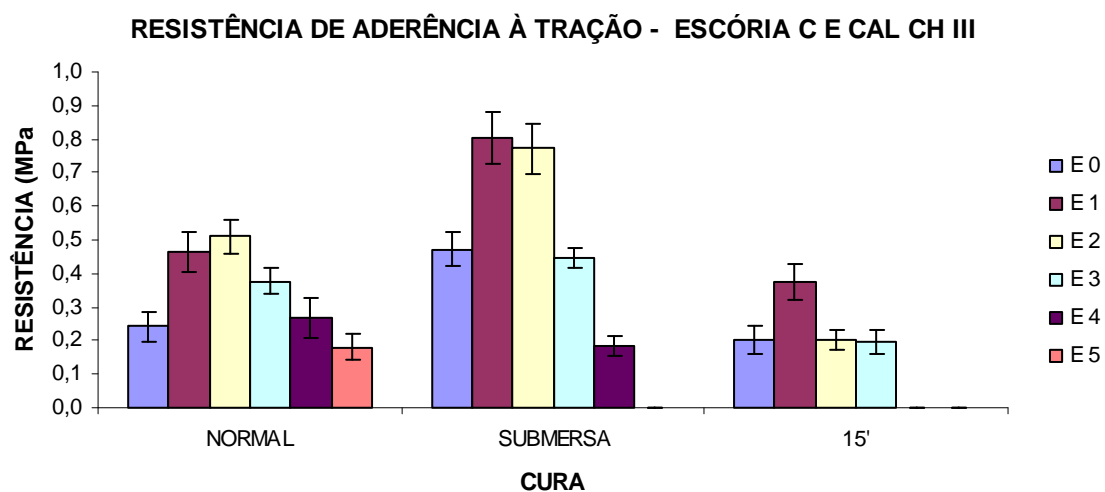


FIGURA 20. GRÁFICO COM OS RESULTADOS DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO DAS COMPOSIÇÕES DE CAL CH-III E A ESCÓRIA C

Conforme destacado no item 4.5, com a adição de cal à argamassa observou-se um expressivo aumento da consistência, duplicando a viscosidade da argamassa em relação à amostra padrão para aproximadamente 560.000 Centipoise. Mesmo com o aumento da adição de água as argamassas E3, E4 e E5 apresentaram uma consistência 12 vezes maior em relação ao padrão, prejudicando assim sensivelmente o tempo em aberto e a sua trabalhabilidade.

Analisando-se as substituições observou-se um aumento de 0,3 MPa para as curas submersas dos traços E1 e E2, no entanto nenhuma delas foi satisfatória, quando confrontado com as recomendações da NBR 14081 [3].

Para a realização dos ensaios de DRX e MEV nas amostras de argamassa endurecida foi adotado que somente seriam avaliados os traços feitos a partir da escória de baixa reatividade (escória C), uma vez que o grau de reatividade das escórias não foi significativo no incremento de suas resistências.

4.7 RESULTADOS DE DRX

Na FIGURA 21, encontra-se apresentado um dos difratogramas típicos obtidos de todos os traços de argamassa, no estado endurecido, com cimentos CP II-Z, CP II-F e a escória C. Os principais picos identificados nos difratogramas foram de quartzo, larnita e brownmillerita.

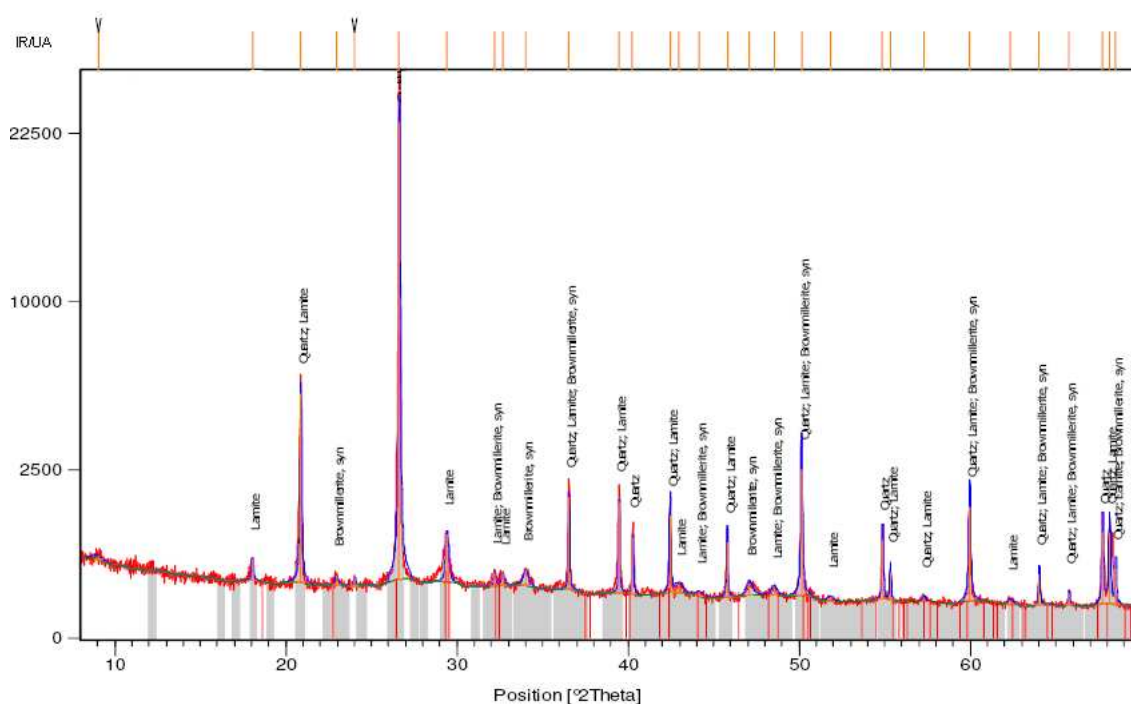


FIGURA 21. DIFRATOGRAMA TÍPICO DE TODOS OS TRAÇOS ESTUDADOS

4.8 RESULTADOS DE MEV

Nas FIGURAS 22, 23 e 24, encontram-se apresentadas as micrografias da superfície de fratura de uma das amostras de argamassa, e a composição química elementar semiquantitativa identificada no espectro da região em destaque.

É importante observar nestas micrografias a formação regular dos poros no interior da argamassa, sendo resultante do processo de mistura em argamassadeira planetária.

As diferentes adições de escória aos traços analisados não alteraram a estrutura das amostras que apresentaram aproximadamente a mesma

quantidade de poros para todos os traços. Por isso, não foram apresentadas novas micrografias.

No espectro aparecem em maiores concentrações a sílica, o cálcio e o oxigênio, sendo componentes químicos majoritários tanto do cimento quanto da escória trabalhados.

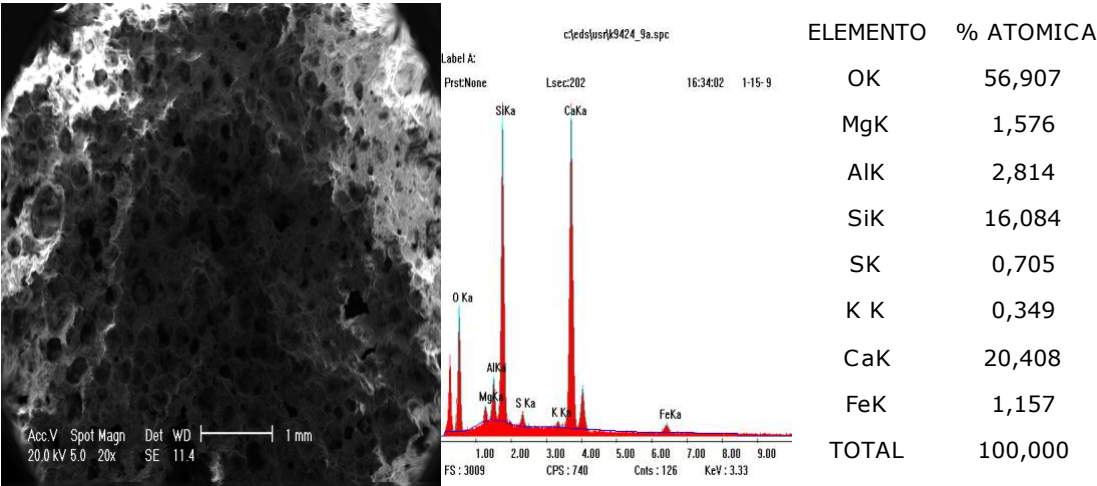


FIGURA 22. MICROGRAFIA DA SUPERFÍCIE DE FRATURA DE UMA DAS AMOSTRAS DE ARGAMASSA ENDURECIDA, AUMENTADA EM 20 VEZES E SEUS RESPECTIVOS ESPECTRO POR MICROSSONDA ANALÍTICA E COMPOSIÇÃO QUÍMICA ELEMENTAR NA REGIÃO DE ANÁLISE.

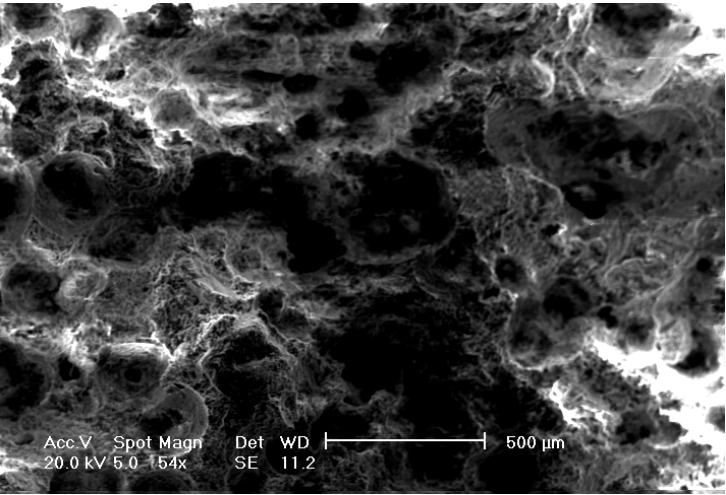


FIGURA 23. MICROGRAFIA DA SUPERFÍCIE DE FRATURA DE UMA DAS AMOSTRAS DE ARGAMASSA ENDURECIDA - AUMENTADA EM 54 VEZES

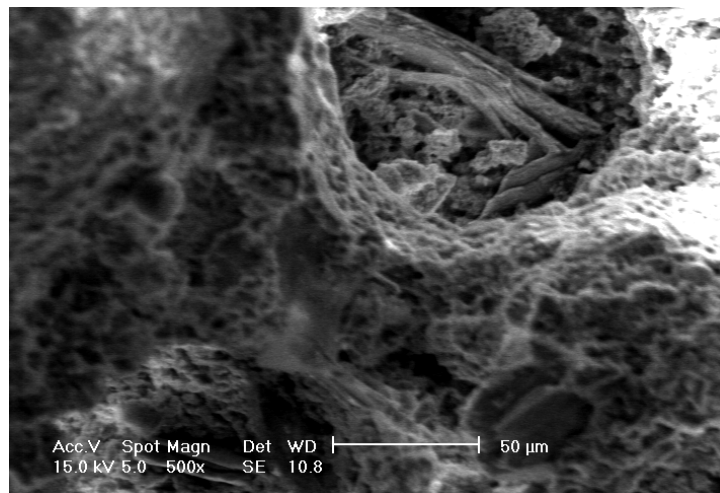


FIGURA 24. MICROGRAFIA DA SUPERFÍCIE DE FRATURA DE UMA DAS AMOSTRAS DE ARGAMASSA ENDURECIDA - AUMENTADA EM 500 VEZES

5. CONCLUSÕES

A adição de escória de alto forno em substituição ao cimento Portland em argamassas colantes do tipo AC I, não alterou as suas características ideais em termos de viscosidade e trabalhabilidade. Pelo contrário, foi verificado durante as suas aplicações melhorias em termos de trabalhabilidade na medida em que se aumentou a proporção das adições de 5 a 20%. Isto se deveu, principalmente, pela característica vítrea dos grãos de escória de alto forno.

A resistência de aderência das argamassas independeu da reatividade das escórias, uma vez que foram obtidos resultados acima dos valores de norma com adições de até 15% dos tipos de escória, de baixa, média e de alta reatividade.

O cimento Portland CP II – F apresentou um desempenho superior ao CP II – Z em termos de resistência de aderência à tração, que variou entre 0,1 e 0,5 MPa, que pode ser atribuído pela maior quantidade de clínquer, essa porcentagem varia entre 90 e 94%.

O teor ótimo de adição para os cimentos CP II - F, e CP II – Z foi de 5% apresentado nos traços F1e Z1, respectivamente. No entanto as amostras com até 20% de substituição de cimento por escória atenderam aos valores de resistência de aderência à tração e tempo em aberto, estabelecidos pela NBR 14081 [3].

Todos os traços feitos somente com escória e cal apresentaram resultados de resistência de aderência à tração e ou tempo em aberto inferiores a 0,5 MPa, portanto abaixo dos valores estabelecidos pela NBR 14081 [3], indicando assim, a inviabilidade da produção de argamassas colantes sem adição de cimento Portland.

De acordo com as análises de FRX, DRX e MEV com EDS não foram obtidas diferenças significativas na composição química e nos produtos de hidratação do cimento dos traços de argamassa, bem como na formação de poros, mesmo quando dosados em diferentes teores de escória.

Com base nesse trabalho concluiu-se pela possibilidade de se produzir uma argamassa colante industrializada, tipo AC I, de maneira mais sustentável, com a adição de escória de alto forno.

Ambientalmente, tem-se como vantagem do método proposto a diminuição da emissão de CO_2 na atmosfera, da ordem de 70 mil toneladas/ano, sendo considerada uma produção média anual de 2,3 milhões de toneladas /ano de argamassa AC I e a substituição direta de 5% (em massa) do cimento utilizado nesta pela escória de alto forno. Em tal cálculo foi considerado como base os valores de emissão médios das indústrias cimenteiras, da ordem de 625 kg de CO_2 para cada tonelada de cimento produzido.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Avaliar a evolução da resistência de aderência à tração, tempo em aberto e durabilidade da argamassa com adição de escória para idades mais prolongadas.

Avaliar a adição de escória de alto forno em outras argamassas industrializadas.

7. REFERÊNCIAS

1. NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 2ª edição. Tradução de Salvador Giamusso. São Paulo: Ed. Pini, 1997.
2. MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto – Estrutura, Propriedades e Materiais**. 2ª edição. São Paulo: Ed. Pini, 1994.
3. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Argamassa colante industrializada para assentamentos de placas cerâmicas – requisitos** - NBR 14081/2004. Rio de Janeiro, 2004.
4. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Argamassa colante industrializada para assentamentos de placas cerâmicas – determinação do tempo em aberto** - NBR 14083/2004. Rio de Janeiro, 2004.
5. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Argamassa colante industrializada para assentamentos de placas cerâmicas – determinação da resistência à tração** - NBR 14084/2004. Rio de Janeiro, 2004.
6. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Argamassa colante industrializada para assentamentos de placas cerâmicas – determinação do deslizamento** - NBR 14085/2004. Rio de Janeiro, 2004.
7. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Argamassa colante industrializada para assentamentos de placas cerâmicas – execução do substrato-padrão e aplicação de argamassa para ensaios** - NBR 14082/2004. Rio de Janeiro, 2004.
8. GEORGE SORRENTINO, **Valorization of Basic Oxygen Steel Slags**. Proceedings of the 7th International Congress on the Chemistry of Cement, v. III, pp. 140 – 144, Paris, 1980.

9. SERSALE, R. **Chracterization and potencial uses of steel slag. Silicates Industriels**, Bruxelles v.51, p.163-170, 1986.
10. RESCHKE, J. S. **Escória Granulada de Fundição Utilizada como Substituição ao Cimento em Concretos: avaliação de propriedades relacionadas com a durabilidade**. Rio Grande do Sul, 2003. Dissertação de Mestrado, UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. Disponível em: <<http://servicos.capes.gov.br/capesdw/resumo.html>> Acesso em: 15 julho. 2007.
11. CHAMON, J. **Estudo da Influência de Adições no Módulo de Elasticidade Dinâmico, na Resistência à Fadiga e na Tenacidade à Fratura para Concretos Convencionais**. Minas Gerais, 2006. Dissertação de Mestrado, UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS. Disponível em: <<http://servicos.capes.gov.br/capesdw/resumo.html>> Acesso em: 15 julho. 2007.
12. PEREIRA, A. C. **Influência das adições minerais na durabilidade do concreto sujeito à carbonatação**. Goiás, 2003. Dissertação de Mestrado, UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS. Disponível em: <<http://servicos.capes.gov.br/capesdw/resumo.html>> Acesso em: 15 julho. 2007
13. MASSUCATO, C. J. **Utilização de escória de alto forno e carvão vegetal como adição no concreto**. São Paulo, 2005. Dissertação de Mestrado, UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS. Disponível em: <<http://servicos.capes.gov.br/capesdw/resumo.html>> Acesso em: 15 julho. 2007.
14. PAL, S. C.; A. MUKHERJEE, A.; PATHAK, S. R. **Investigation of hydraulic activity of ground granulated blast furnace slag in concrete**. Cement and Concrete Research 33, 2003, p. 1481 – 1486. Faculty of Civil Engineering, College of Military Engineering; Faculty of Civil Engineering, Indian Institute of Technology; Department of Civil Engineering, Government College of Engineering, India.

15. ESPER, M. W.; HELENE, P. **Características do Cimento Portland de Alto-Forno**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, 1993
16. COLLINS F. G.; SANJAYAN, J. G. **Workability and mechanical properties of alkali activated slag concrete**. Cement and Concrete Research 29, 1999, p. 455-458. Department of Civil Engineering, Monash University, Australia.
17. BAKHAREV, T.; SANJAYAN, J.G; CHENG, YI-BING. **Alkali activation of Australian slag cements**. Cement and Concrete Research 29, 1999, p. 113 – 120. Department of Civil Engineering and Department of Materials Engineering Monash University, Australia.
18. BAKHAREV, T.; SANJAYAN, J. G; Cheng, YI-BING. **Effect of admixtures on properties of alkali-activated slag concrete**. Cement and Concrete Research 30, 2000, p. 1367 – 1374. Department of Civil Engineering, Monash University, Australia.
19. XINGHUA FU, WENPING HOU, CHUNXIA YANG, DONGXUE LI, XUEQUAN WU. **Studies on high-strength slag and fly ash compound cement**. Cement and Concrete Research 30, 2000, p. 1239 – 1243. Shandong Institute of Building Materials, Department of Materials Science and Engineering; Nanjing University of Chemical Technology, Republic of China.
20. CAIJUN, SHI; SHUNFU, HU. **Cementitious properties of ladle slag fines under autoclave curing conditions**. Cement and Concrete Research 33, 2003, p. 1851 – 1856. CJS Technology Inc., Canada; Department of Geography, Southern Illinois University-Edwardsville, USA.
21. OLIVEIRA, C. T. A. **Água do poro de pastas de cimento de escória**. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2000.

22. SILVA, M. G. **Influência da cura térmica em pastas e argamassas de cimentos de escória de alto-forno.** São Paulo, 1998. Tese de Doutorado, UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Disponível em: <<http://servicos.capes.gov.br/capesdw/resumo.html>> Acesso em: 15 julho. 2007.
23. FREITAS, FERNANDO A. ERLUND. **Microfissuração e evolução da hidratação de concreto de cimento portland, com e sem adição de escória, por meio da análise de imagens.** São Paulo, 2001. Dissertação de Mestrado, UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS Disponível em: <<http://servicos.capes.gov.br/capesdw/resumo.html>> Acesso em: 15 julho. 2007.
24. RICHARDSON, I. G. e CABRERA, J. G. **The nature of C-S-H in model slag-cements.** Cement & Concrete Composites 22, 2000. p 259 – 266. Civil Engineering Materials Unit, School of Civil Engineering, University of Leeds, Leeds, UK
25. DEJA, J. **Immobilization of Cr^{6+} , Cd^{2+} , Zn^{2+} and Pb^{2+} in alkali-activated slag binders.** Cement and Concrete Research 32, 2002, p. 1971 – 1979. Faculty of Materials Science and Ceramics, University of Mining and Metallurgy, Cracow, Poland.
26. LIDUÁRIO, A. S. **Contribuição ao Estudo das Propriedades Térmicas do Concreto Convencional na Presença das Adições Minerais.** Goiás, 2006. Dissertação de Mestrado, UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS. Disponível em: <<http://servicos.capes.gov.br/capesdw/resumo.html>> Acesso em: 15 julho. 2007.
27. COSTA, M. R. M. M. **Análise comparativa de argamassas colantes de mercado através de parâmetros reológicos.** São Paulo, 2006. Tese de Doutorado, UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Disponível em: <<http://servicos.capes.gov.br/capesdw/resumo.html>> Acesso em: 22 setembro. 2007.

28. CARDOSO, A.; CARBONE, J. P. **Caracterização reológica de revestimentos a base de gesso por squeeze-flow**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.
29. BOURGUIGNON, K. M. B. G. **Influência da resistência à compressão em concretos com diferentes teores de escória de alto-forno**. Espírito Santo, 2004. Dissertação de Mestrado, UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO. Disponível em: <<http://servicos.capes.gov.br/capesdw/resumo.html>> Acesso em: 15 julho. 2007.
30. NETO, A. A. M. **Estudo da Retração em Argamassa com Cimento de Escória Ativada**. São Paulo, 2002. Dissertação de Mestrado, UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Disponível em: <<http://servicos.capes.gov.br/capesdw/resumo.html>> Acesso em: 15 julho. 2007.
31. OSBORNE, G. J. **Durability of Portland blast-furnace slag cement concrete**. Cement and Concrete Composites 21, 1999, p. 11 – 21. Turnpike Drive, Luton, UK.
32. JAUL, W. C.; TSAY, S. **A Study of the basic engineering properties of slag cement concret and its resistance to seawater corrosion**. Cement and Concrete Research, Vol. 28, No. 10, pp. 1363–1371, 1998. Dept. of Civil Engineering, National Chiao-Tung University, Taiwan, Republic of China.
33. HOU, W.; CHANG, P.; HWANG, C. **A study on anticorrosion effect in high-performance concrete by the pozzolanic reaction of slag**. Cement and Concrete Research 34, 2004, p. 615 – 622. Department of Construction Engineering, National Taiwan University of Science and Technology; Department of Civil Engineering, Van Nung University of Technology, Taiwan.
34. BAKHAREV, T.; SANJAYAN, J. G.; CHENG, YI-BING. **Resistance of alkali-activated slag concrete to carbonation**. Cement and Concrete Research 31, 2001, p. 1277 – 1283. Department of Civil Engineering and Department of Materials Engineering Monash University, Australia.

35. RAI, A.; PRABAKAR, J.; RAJU, C.B.; MORCHALLE, R. K. **Metallurgical slag as a component in blended cement**. Construction and Building Materials 16, 2002, p. 489 – 494. Building Materials and Technology Promotion Council; Regional Research Laboratory, India.
36. DAL MOLIN, D. C. C.; GEYER, R. T.; VILELA, A. **Technical study of an alternative cement with electric arc furnace slag**. Cement And Concrete Composite, 2003.
37. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Cimento Portland – determinação da resistência à compressão - NBR 72165/1996**. Rio de Janeiro, 1996.
38. MACHADO, A. T. **Estudo comparativo dos métodos de ensaio para avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2000.
39. ARIVABENI, L. F. **Contribuição ao estudo de utilização da escória bruta e granulada de alto forno para produção de concretos**. Espírito Santo, 2000. Dissertação de Mestrado, UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO. Disponível em: <<http://servicos.capes.gov.br/capesdw/resumo.html>> Acesso em: 15 julho. 2007.
40. COELHO, M. A. M. **Contribuição ao estudo da carbonatação e da retração em concretos com elevados teores de escória de alto-forno**. Espírito Santo, 2002. Dissertação de Mestrado, UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO. Disponível em: <<http://servicos.capes.gov.br/capesdw/resumo.html>> Acesso em: 15 julho. 2007.
41. AMORIM, L.V.; LIRA, H.L.; FERREIRA, H.C. **Use of residential construction waste and residues from red ceramic industry in alternative mortars**. Journal of Environmental Engineering, v. 129, n. 10, p. 916-920, 2003.

42. BIANCHINI, G.; MARROCCHINO, E.; TASSINARI, R.; VACCARO, C. **Recycling of construction and demolition waste materials: A chemical-mineralogical appraisal.** Waste Management, v. 25, n.2 spec. issue, p 149-159, 2005.
43. HEIKAL, M.; AIAD, I.; HELMY, I. M. **Portland cement clinker, granulated slag and by-pass cement dust composites.** Cement and Concrete Research 32, 2002, p. 1805–1812. Institute of Efficient Productivity, Zagazig University, Zagazig; Egyptian Petroleum Research Institute; Faculty of Science, Zagazig University, Egypt.
44. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Cimento Portland – determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine)** - NBR NM 76/1998. Rio de Janeiro, 1998.
45. BATTAGIN, A. F. **Método microscópico rápido para verificação da reatividade de escórias de alto forno.** Boletim Informativo de Microscopia n 3, São Paulo, 1984.
46. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Agregados – determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem** - NBR NM 46/2003. Rio de Janeiro, 2003.
47. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Agregado fino – determinação de impurezas orgânicas** - NBR NM 49/2001. Rio de Janeiro, 2001.
48. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Agregados – Determinação da composição granulométrica** – NBR NM 248/2003. Rio de Janeiro, 2003.
49. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Cimento Portland comum** – NBR 5732/1991. Rio de Janeiro, 1991.
50. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Cimento Portland composto** – NBR 11578/1991. Rio de Janeiro, 1991.

51. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Cal hidratada para argamassas – requisitos** - NBR 7175/2003. Rio de Janeiro, 2003.
52. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Cimento Portland e outros materiais em pó – determinação da massa específica** - NBR NM 23/2001. Rio de Janeiro, 2001.
53. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Cimento Portland – determinação da pasta de consistência normal** - NBR NM 43/2003. Rio de Janeiro, 2003.
54. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Cimento Portland – determinação da expansibilidade de Le Chatelier** - NBR 11582/1991. Rio de Janeiro, 1991.
55. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Cimento Portland – determinação do tempo de pega** - NBR NM 65/2003. Rio de Janeiro, 2003.
56. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Cimento Portland e outros materiais em pó – determinação do índice de finura por meio de peneirador aerodinâmico** - NBR 12826/1993. Rio de Janeiro, 1993.
57. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos** - NBR 10005/2001. Rio de Janeiro, 2001.
58. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Resíduos sólidos - classificação** - NBR 10004/2001. Rio de Janeiro, 2001.
59. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Agregados para concreto – especificação** - NBR 7211/2005. Rio de Janeiro, 2005.

60. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Cimento Portland pozolânico - Determinação da pozolanicidade** - NBR 5753/1992. Rio de Janeiro, 1992.
61. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Materiais pozolânicos - Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland - Índice de atividade pozolânica com cimento** - NBR 5752/1992. Rio de Janeiro, 1992.
62. ANDRIOLO, F. R., **Construções de Concreto, manual de práticas para controle e execução**. Editora Pini, 1984, São Paulo.

8. ANEXOS

ANEXO 1 - Difratoograma de Raio X do traço Z0 – 28 dias

ANEXO 2 - Difratoograma de Raio X do traço Z1 – 28 dias

ANEXO 3 - Difratoograma de Raio X do traço Z2 – 28 dias

ANEXO 4 - Difratoograma de Raio X do traço Z3 – 28 dias

ANEXO 5 - Difratoograma de Raio X do traço Z4 – 28 dias

ANEXO 6 - Difratoograma de Raio X do traço Z5 – 28 dias

ANEXO 7 – Difratoograma de Raio X do traço F0 – 28 dias

ANEXO 8 - Difratoograma de Raio X do traço F1 – 28 dias

ANEXO 9 - Difratoograma de Raio X do traço F2 – 28 dias

ANEXO 10 - Difratoograma de Raio X do traço F3 – 28 dias

ANEXO 11 - Difratoograma de Raio X do traço F4 – 28 dias

ANEXO 12 - Composição carga moedora do moinho de bolas

ANEXO 1 - Difratoograma de Raio X do traço Z0 – 28 dias

Measurement Conditions:

Peak List:

Ref. Code	Score	Compound Name	Scale Factor	Chemical Formula	SemiQuant [%]
01-085-0504	90	Quartz	0,993	Si O ₂	93
01-087-0673	27	Portlandite, syn	0,007	Ca (O H) ₂	1
01-072-1937	26	Calcite	0,024	Ca C O ₃	2
01-086-0402	15	Hatrurite, syn	0,015	Ca ₃ Si O ₅	5

Pattern List: *(Bookmark 4)*

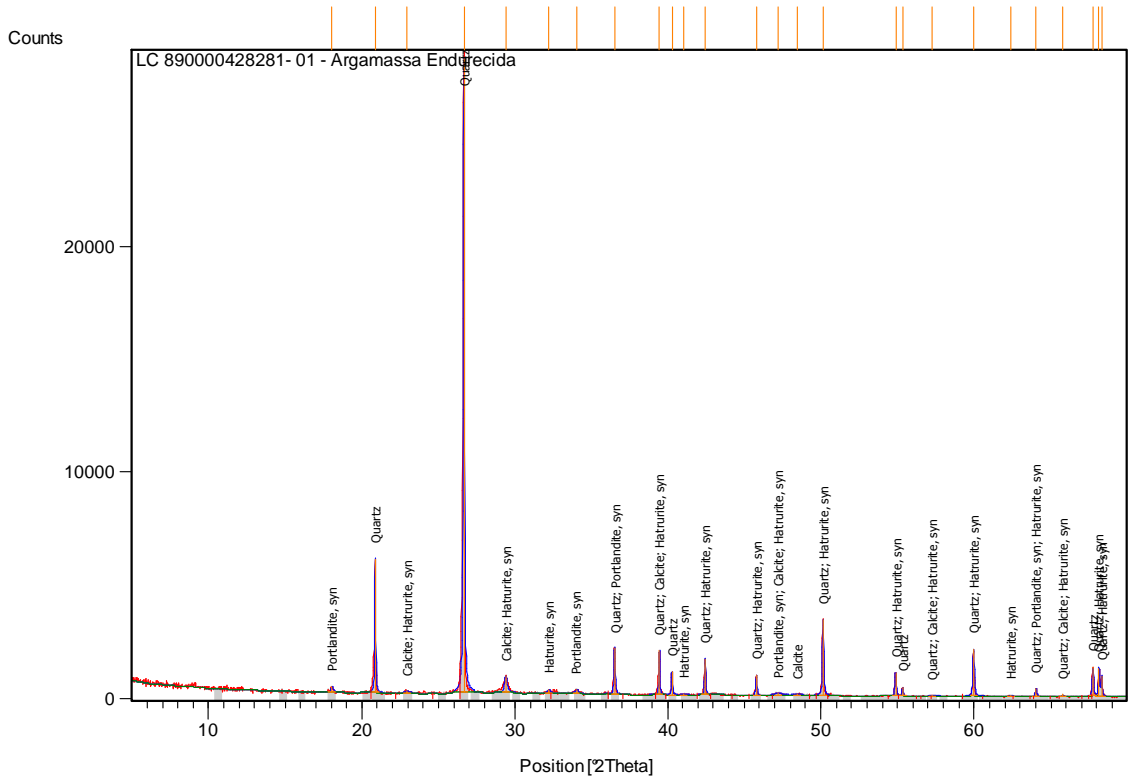
Phase Quartz
Weight fraction/ % 93,0

Phase Portlandite, syn
Weight fraction/ % 1,0

Phase Calcite
Weight fraction/ % 2,0

Phase Hatrurite, syn
Weight fraction/ % 5,0

Document History: (Bookmark 5)



ANEXO 2 - Difractograma de Raio X do traço Z1 – 28 dias

Measurement Conditions:

Peak List:

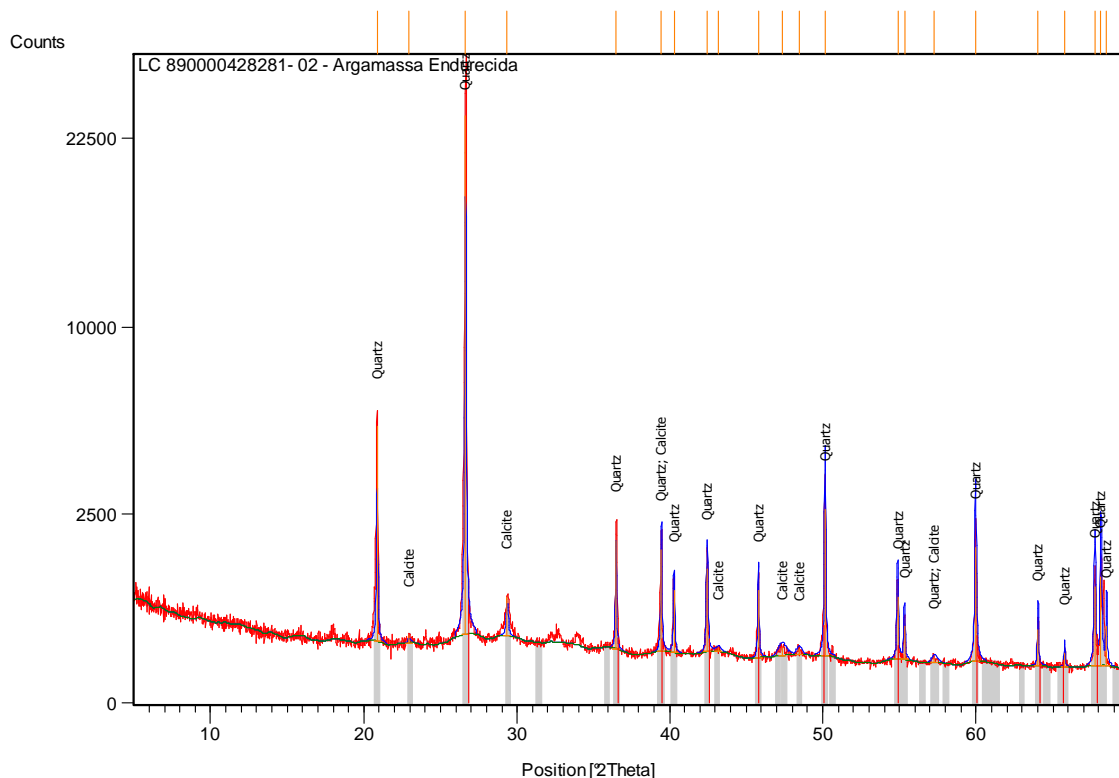
Ref. Code	Score	Compound Name	Scale Factor	Chemical Formula	SemiQuant [%]
01-085-1054	92	Quartz	0,879	Si O2	98
01-072-1937	27	Calcite	0,018	Ca C O3	2

Pattern List:

Phase Quartz
Weight fraction/ % 98,0

Phase Calcite
Weight fraction/ % 2,0

Document History:



ANEXO 3 - Difratoograma de Raio X do traço Z2 – 28 dias

Measurement Conditions:

Peak List:

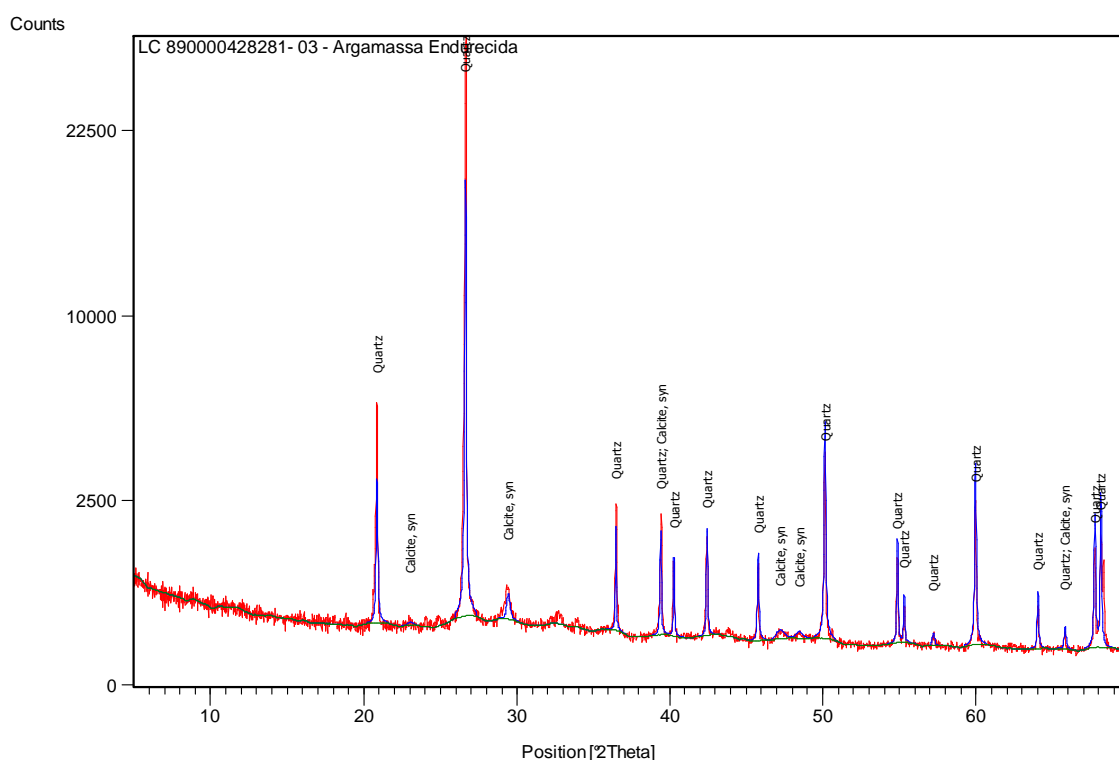
Ref. Code	Score	Compound Name	Scale Factor	Chemical Formula	SemiQuant [%]
01-079-1910	95	Quartz	0,952	Si O ₂	98
01-072-1214	25	Calcite, syn	0,018	Ca C O ₃	2

Pattern List:

Phase Quartz
Weight fraction/ % 98,0

Phase Calcite, syn
Weight fraction/ % 2,0

Document History:



ANEXO 4 - Difratoograma de Raio X do traço Z3 – 28 dias

Measurement Conditions:

Peak List:

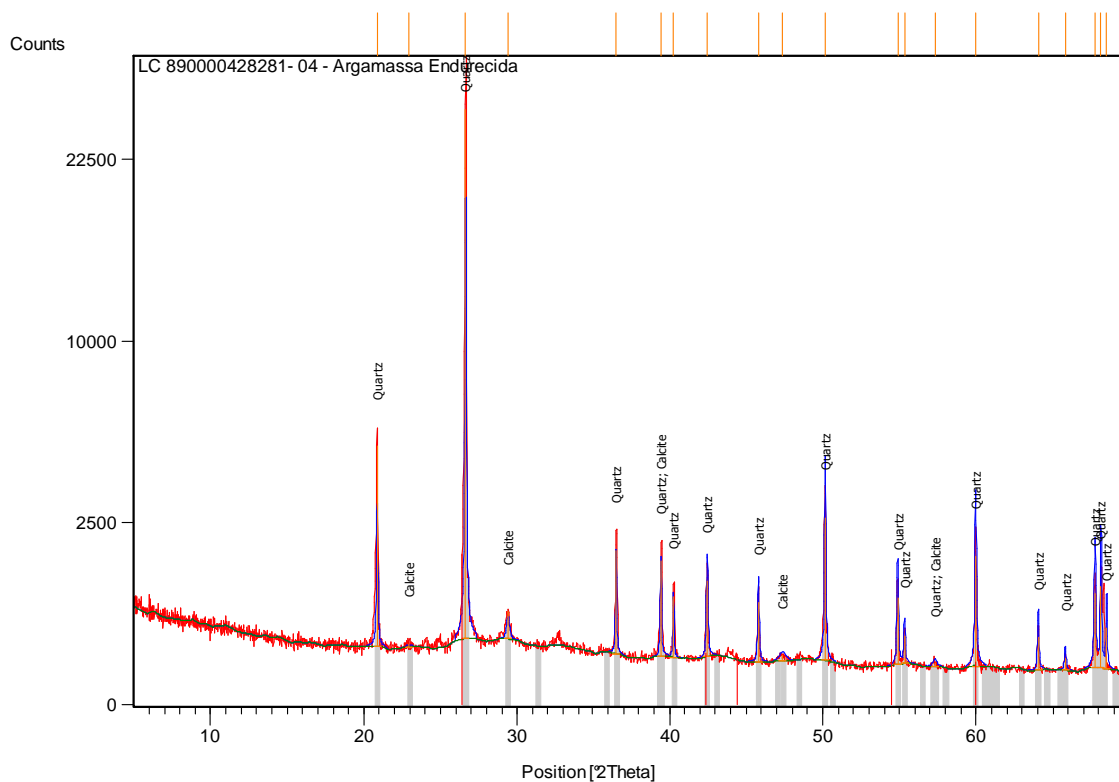
Ref. Code	Score	Compound Name	Scale Factor	Chemical Formula	SemiQuant [%]
01-078-2315	93	Quartz	0,958	Si O ₂	99
01-072-1937	18	Calcite	0,009	Ca C O ₃	1

Pattern List:

Phase Quartz
Weight fraction/ % 99,0

Phase Calcite
Weight fraction/ % 1,0

Document History:



ANEXO 5 - Difratoograma de Raio X do traço Z4 – 28 dias

Measurement Conditions:

Peak List:

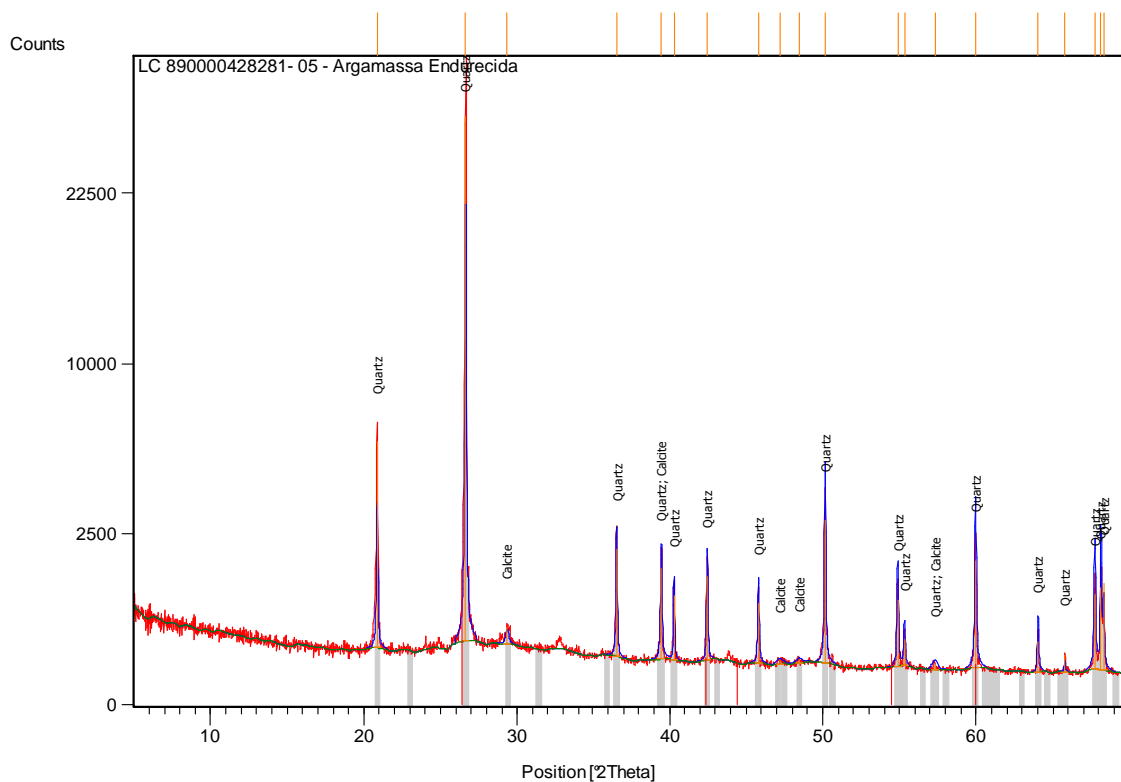
Ref. Code	Score	Compound Name	Scale Factor	Chemical Formula	SemiQuant [%]
01-085-1054	95	Quartz	0,792	Si O ₂	99
01-072-1937	24	Calcite	0,008	Ca C O ₃	1

Pattern List:

Phase Quartz
Weight fraction/ % 99,0

Phase Calcite
Weight fraction/ % 1,0

Document History:



ANEXO 6 - Difratoograma de Raio X do traço Z5 – 28 dias

Measurement Conditions:

Peak List:

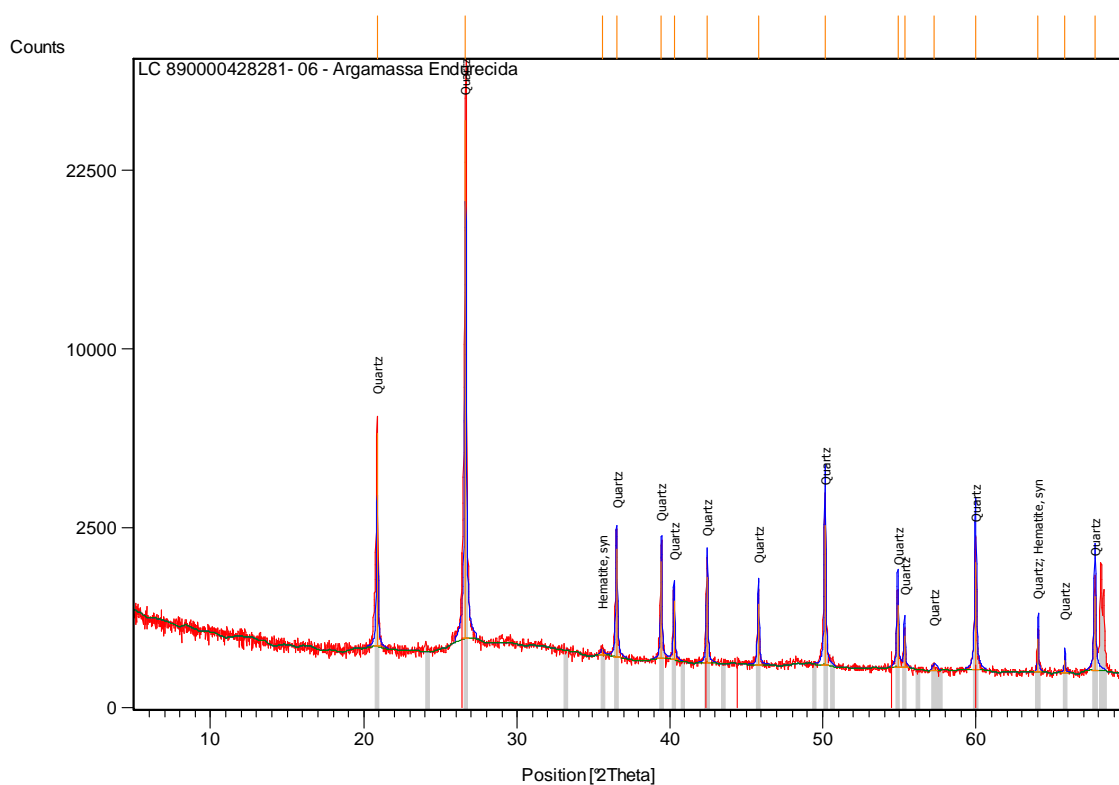
Ref. Code	Score	Compound Name	Scale Factor	Chemical Formula	SemiQuant [%]
01-078-2315	92	Quartz	0,987	Si O2	92
01-073-0603	14	Hematite, syn	0,002	Fe2 O3	8

Pattern List:

Phase Quartz
Weight fraction/ % 92,0

Phase Hematite, syn
Weight fraction/ % 8,0

Document History:



ANEXO 7 - Difratoograma de Raio X do traço F0 – 28 dias

Measurement Conditions:

Peak List:

Ref. Code	Score	Compound Name	Scale Factor	Chemical Formula	SemiQuant [%]
01-075-0443	88	Quartz	0,967	Si O ₂	94
01-086-2339	41	Calcite	0,024	Ca (C O ₃)	2
01-077-0388	11	Larnite	0,008	Ca ₂ Si O ₄	3

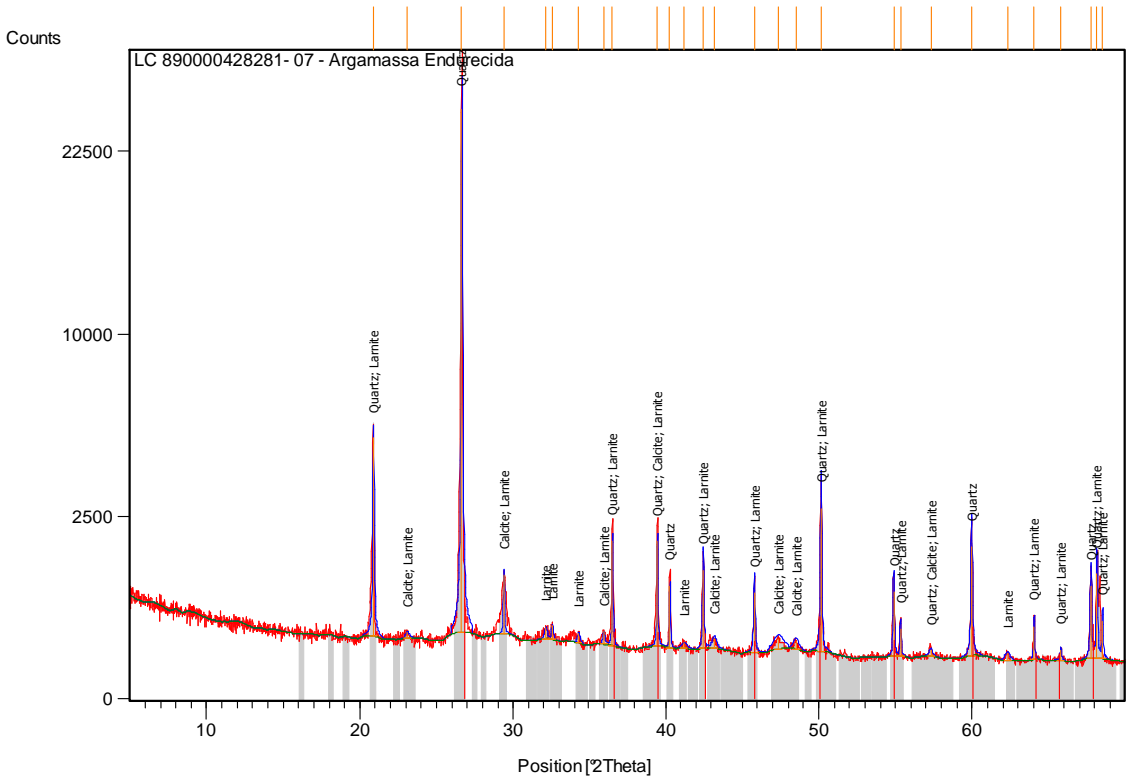
Pattern List:

Phase Quartz
Weight fraction/ % 94,0

Phase Calcite
Weight fraction/ % 2,0

Phase Larnite
Weight fraction/ % 3,0

Document History:



ANEXO 8 - Difratoograma de Raio X do traço F1 – 28 dias

Measurement Conditions:

Peak List:

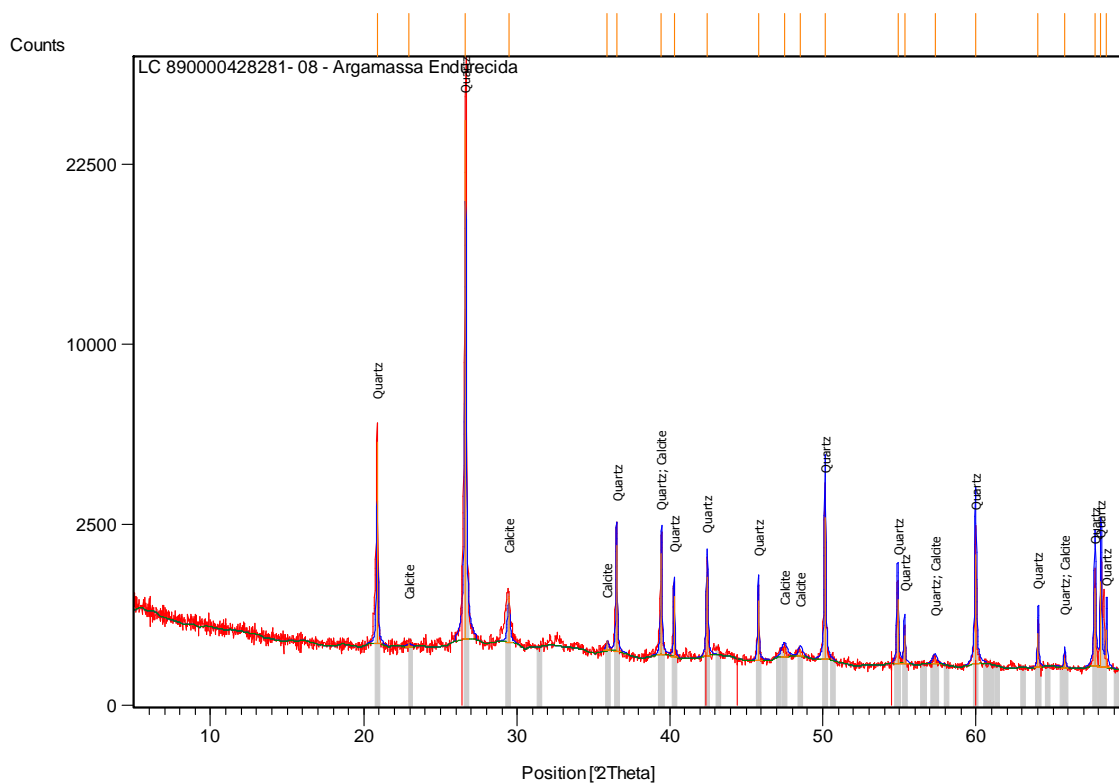
Ref. Code	Score	Compound Name	Scale Factor	Chemical Formula	SemiQuant [%]
01-085-0504	92	Quartz	0,987	Si O ₂	98
01-083-1762	25	Calcite	0,022	Ca (C O ₃)	2

Pattern List:

Phase Quartz
Weight fraction/ % 98,0

Phase Calcite
Weight fraction/ % 2,0

Document History:



ANEXO 9 - Difratoograma de Raio X do traço F2 – 28 dias

Measurement Conditions:

Peak List:

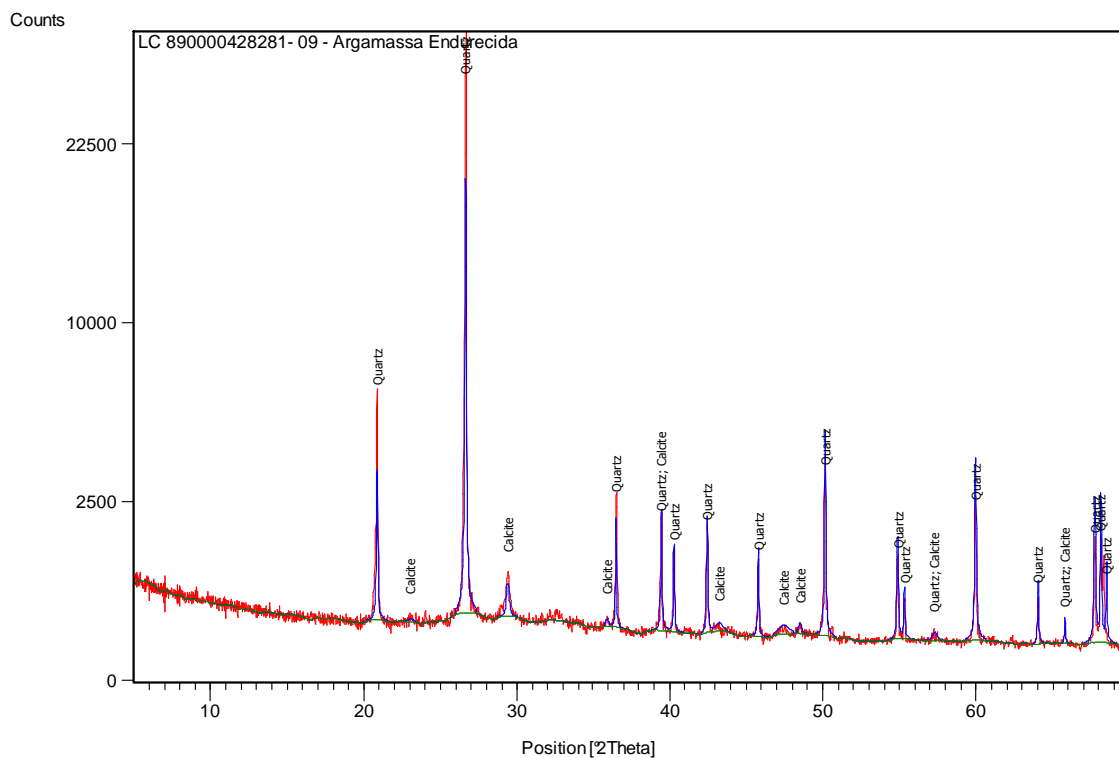
Ref. Code	Score	Compound Name	Scale Factor	Chemical Formula	SemiQuant [%]
01-079-1910	92	Quartz	0,862	Si O ₂	98
01-086-2334	34	Calcite	0,021	Ca (C O ₃)	2

Pattern List:

Phase Quartz
Weight fraction/ % 98,0

Phase Calcite
Weight fraction/ % 2,0

Document History:



ANEXO 10 - Difratoograma de Raio X do traço F3 – 28 dias

Measurement Conditions:

Peak List:

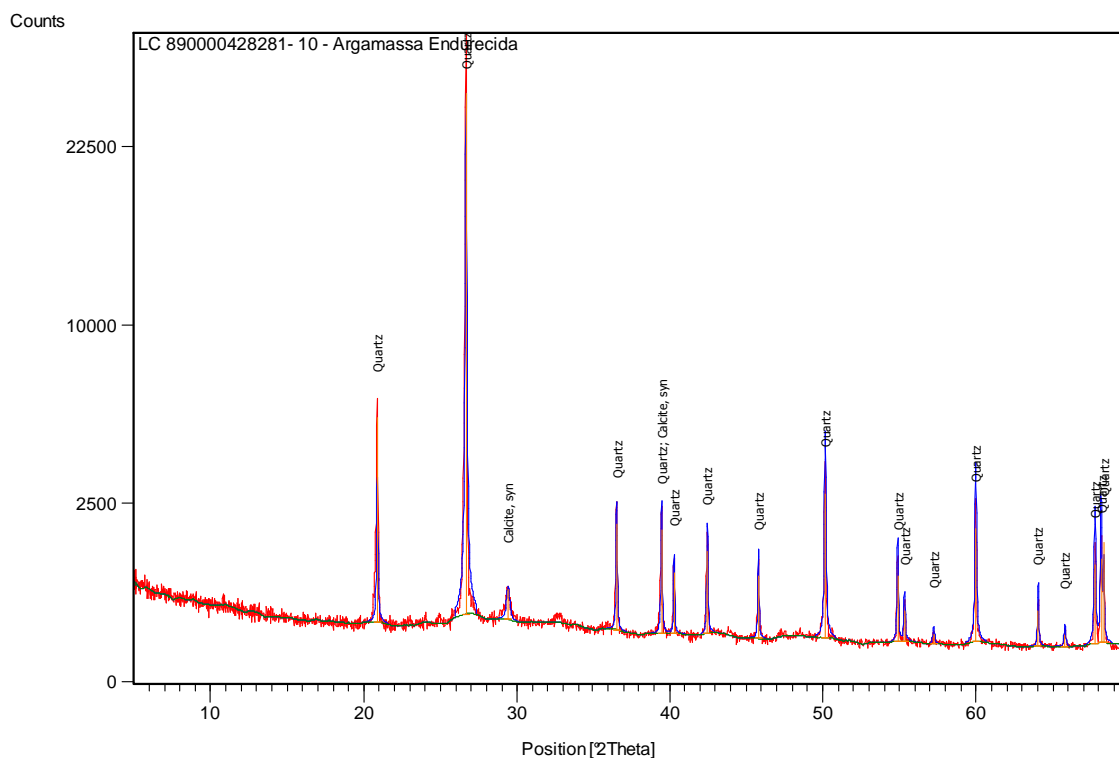
Ref. Code	Score	Compound Name	Scale Factor	Chemical Formula	SemiQuant [%]
01-078-2315	92	Quartz	0,962	Si O ₂	98
01-072-1214	14	Calcite, syn	0,015	Ca C O ₃	2

Pattern List:

Phase Quartz
Weight fraction/ % 98,0

Phase Calcite, syn
Weight fraction/ % 2,0

Document History:



ANEXO 11 - Difratoograma de Raio X do traço F4 – 28 dias

Measurement Conditions:

Peak List:

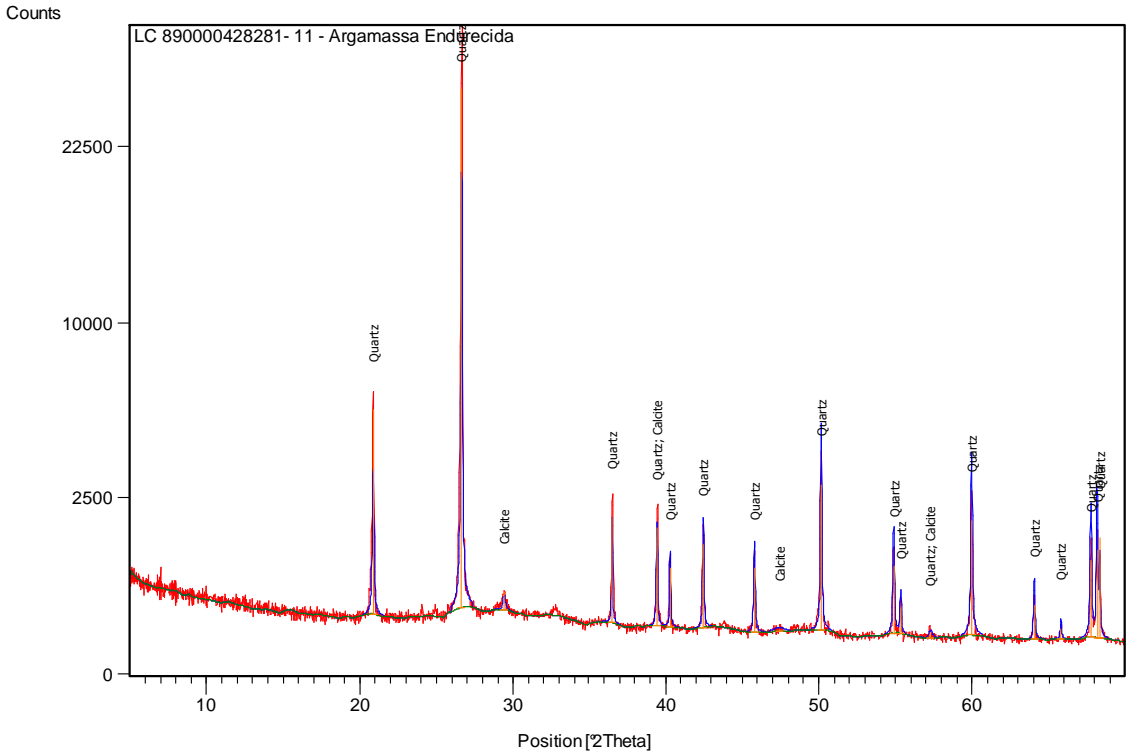
Ref. Code	Score	Compound Name	Scale Factor	Chemical Formula	SemiQuant [%]
01-085-0504	96	Quartz	0,986	Si O ₂	99
01-072-1937	19	Calcite	0,007	Ca C O ₃	1

Pattern List:

Phase Quartz
Weight fraction/ % 99,0

Phase Calcite
Weight fraction/ % 1,0

Document History:



ANEXO 12 - Composição carga moedora do moinho de bolas

Dimensões / Pesos bolas moinho		
Diâmetro	Massa/um	Massa total
77.mm	1752 gr	7,640 Kg
68.mm	1220 gr	4,725 Kg
57.mm	728 gr	15,800 Kg
47.mm	369 gr	4,200 Kg
40.mm	235 gr	26,850 Kg
31.mm	102 gr	84,400 Kg
25.mm	50 gr	38,440 Kg
20.mm	34 gr	12,240 Kg
TOTAL		194,295 Kg